



Прямое измерение потока и спектра солнечных нейтрино 20 лет работы BOREXINO

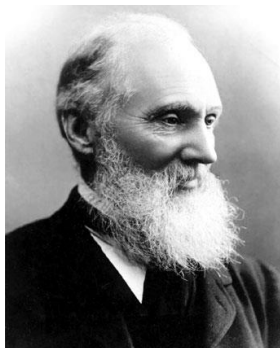
Чепурнов А.С., Громов М.Б.

Какой источник энергии питает звезды ?(XIX в)

Наиболее очевидным свойством звезд является то, что они являются самосветящимися телами.
За счет чего покрываются их энергетические потери?

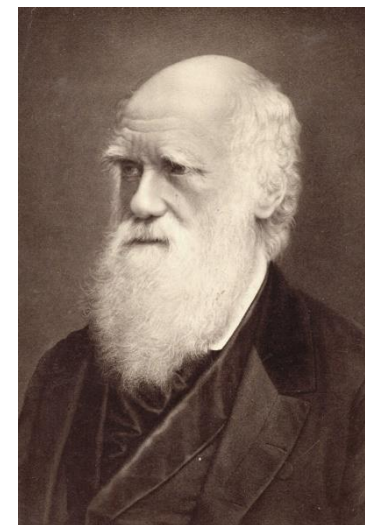


*Hermann
Ludwig
Ferdinand
von
Helmholtz*



*William Thomson
(Lord Kelvin)*

Гравитация ? => *Возраст Солнца не
может быть больше
~20.000.000 years*



Charles Darwin

*Геология и биология
дают оценку
возраста Земли
>300.000.000 л*



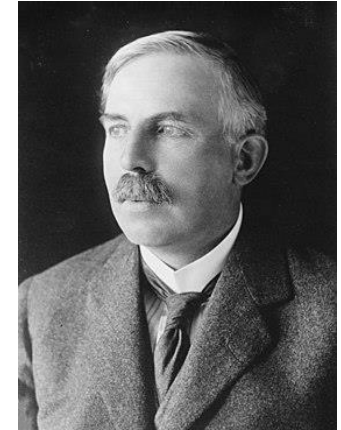
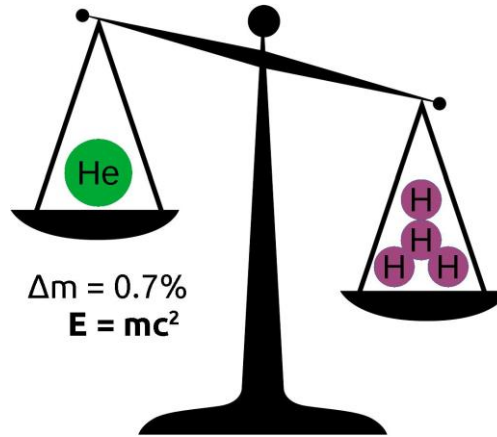
*Julius Robert
von Mayer*

*Кинетическая энергия
выпадающего на Солнце
метеорного вещества*

Теоретическое решение проблемы горения Солнца



Arthur Stanley
Eddington



Ernest Rutherford

“Температура в центре Солнца - 20 МК” (15,5 МК)

«Туннельный эффект !»

Р.Аткинсон и Ф.Хаутерманс
(1929 г)

+

=>

Г.А.Гамов
Теория α-распада



Carl F. von Weizsacker

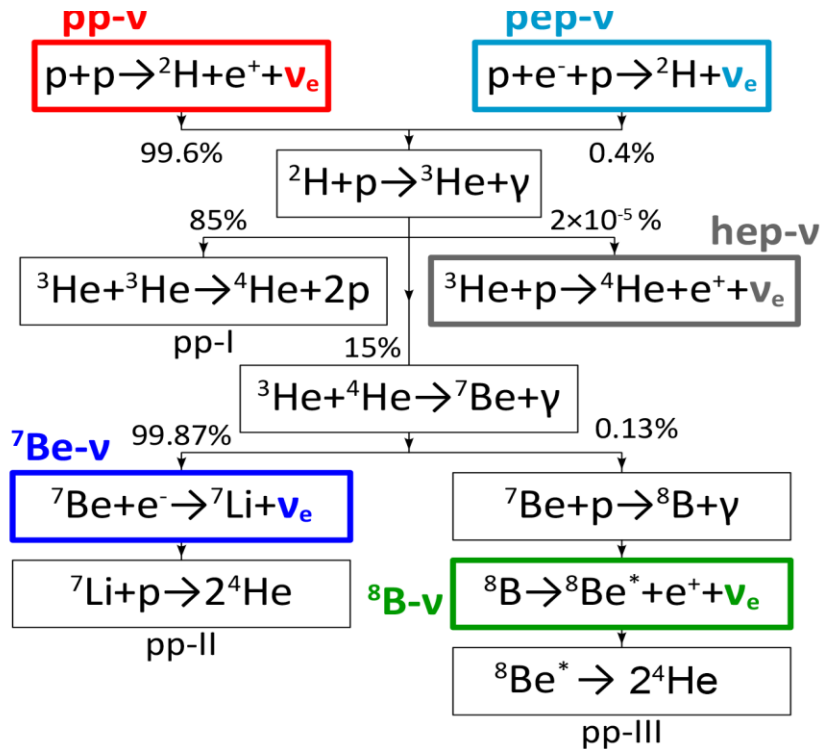


Hans Bethe
(Nobel 1967)

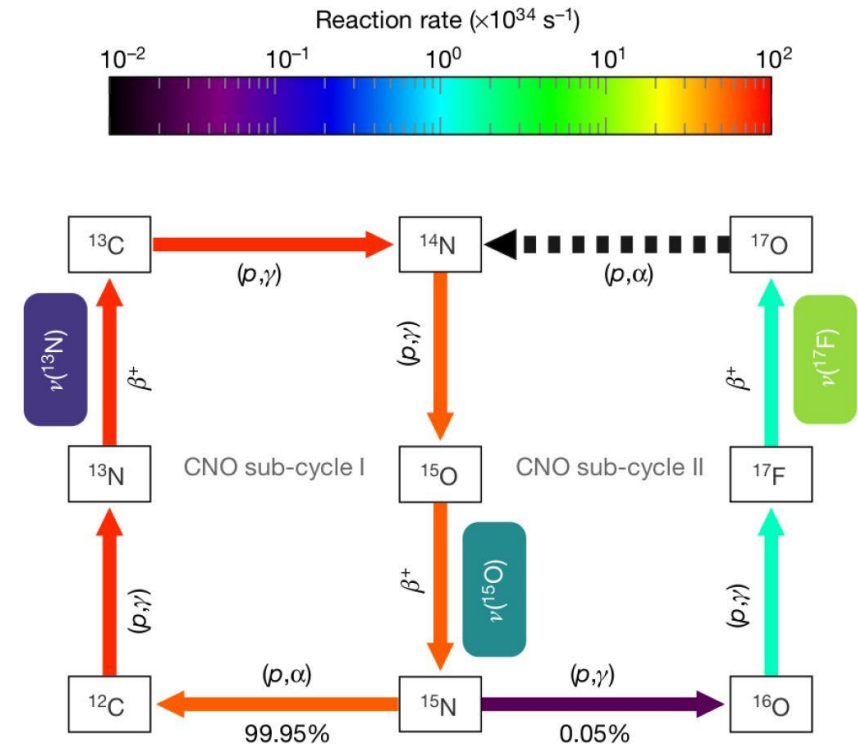
Источником энергии Солнца является «горение» водорода
в термоядерных реакциях в pp и CNO циклах (1938)

Нуклеосинтез в недрах Солнца: термоядерные реакции превращения водорода в гелий

pp-цикл (99% энергии Солнца)



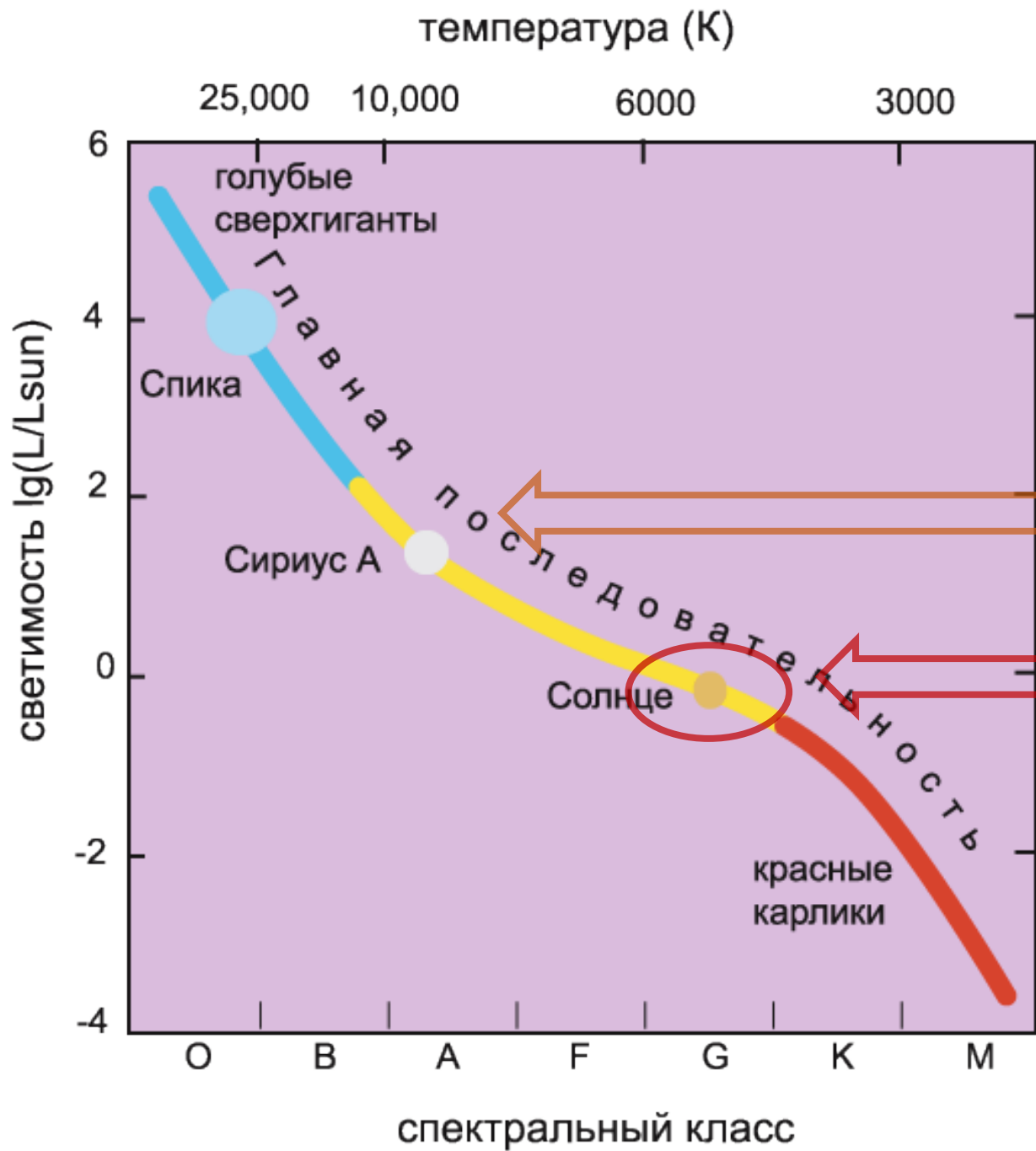
CNO-цикл (1% энергии Солнца)



- von Weizsäcker, C. F. Über Elementumwandlungen im Innern der Sterne I. *Phys. Z.* 38, 176 (1937)
- Bethe, H. A. & Critchfield, C. L. The formation of deuterons by proton combination. *Phys. Rev.* 54, 248 (1938)
- Fowler, W. Experimental and theoretical nuclear astrophysics; the quest for the origin of the elements: **Nobel prize lecture**. *Rev. Mod. Phys.* 56, 149 (1984).

- ${}^{12}\text{C}$ - катализатор реакции
- Bethe, H. Energy production in stars. *Phys. Rev.* 55, 434 (1939).

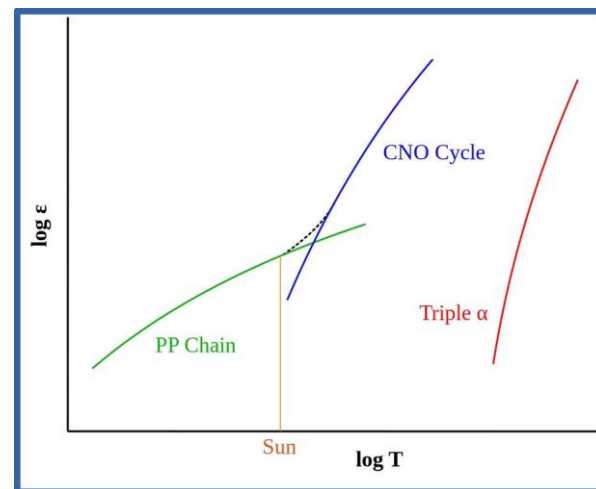
Исследование потоков нейтрино (счетный метод и спектроскопия) в настоящее время считается единственным прямым методом исследованием ядра Солнца и прояснения вопроса об источнике солнечной энергии



Доминирование
разных термоядерных циклов
в зависимости от типа звезд

Доминирование CNO-цикла

Доминирование pp-цикла



Спектры солнечных нейтрино по данным Стандартной модели Солнца

pp 90% - $\sim 6.5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$
 ${}^7\text{Be}$ 10% - $\sim 5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$

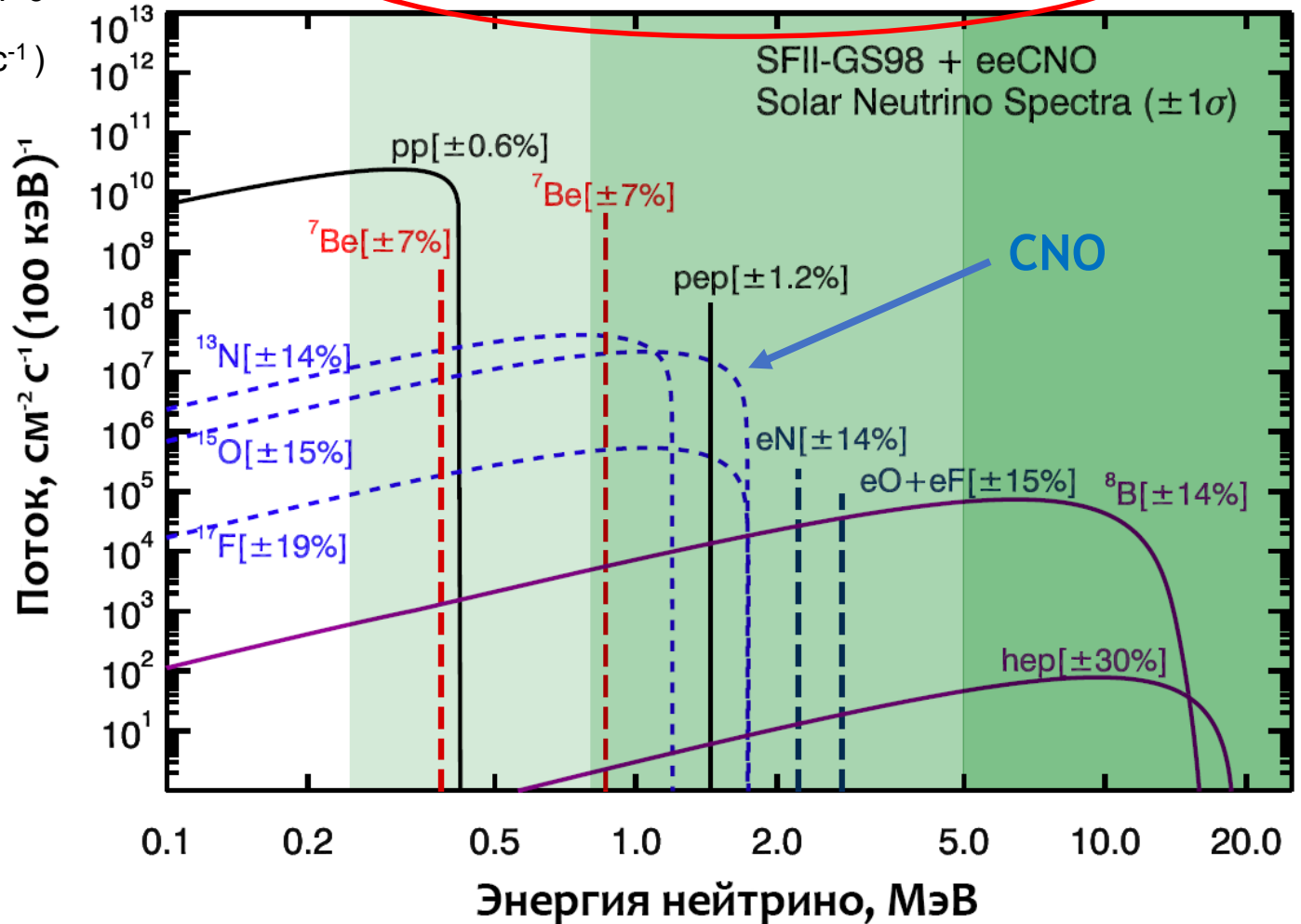
($< 1\% \text{ } {}^8\text{B}$ - $6 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$)

Солнечная светимость

Радиус

Текущий состав
поверхности

Металличность Солнца
($Z > 2$) HZ ? LZ



Bahcall, J. N. *Neutrino Astrophysics* (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1989).

Vinyoles, N. et al. *A new generation of standard solar models*. *Astrophys. J.* 835, 202 (2017).



Borexino Collaboration



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI MILANO



PRINCETON
UNIVERSITY



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI
DI GENOVA



NATIONAL RESEARCH CENTER
"KURCHATOV INSTITUTE"



St. Petersburg
Nuclear Physics Inst.



JAGIELLONIAN
UNIVERSITY
IN KRAKÓW



JÜLICH
FORSCHUNGSZENTRUM



НИИЯФ
МГУ
SKOBELTSYN INSTITUTE OF
NUCLEAR PHYSICS
LOMONOSOV MOSCOW STATE
UNIVERSITY



Joint Institute for
Nuclear Research

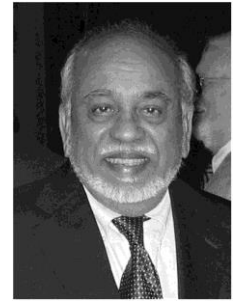


TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN

RWTH AACHEN
UNIVERSITY

История эксперимента Борексино

1988: S.Raghavan and S. Pakvasa, Phys.Rev. D37, 849-857 (1988)



Raju Raghavan
(1937-2011)

1990: идея о создании суб-МэВного детектора солнечных нейтрино реального времени (*Gianpaolo Bellini & Franc Calaprice*)

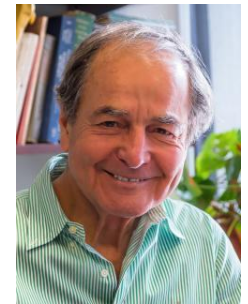
1995: STF проверка возможности ультра низкого фона

$$^{238}\text{U}, ^{232}\text{Th} < 10^{-16} \text{ g/g} \quad ^{14}\text{C}/^{12}\text{C} < 10^{-18}$$

1996-1997: Одобрение проекта



Gianpaolo Bellini

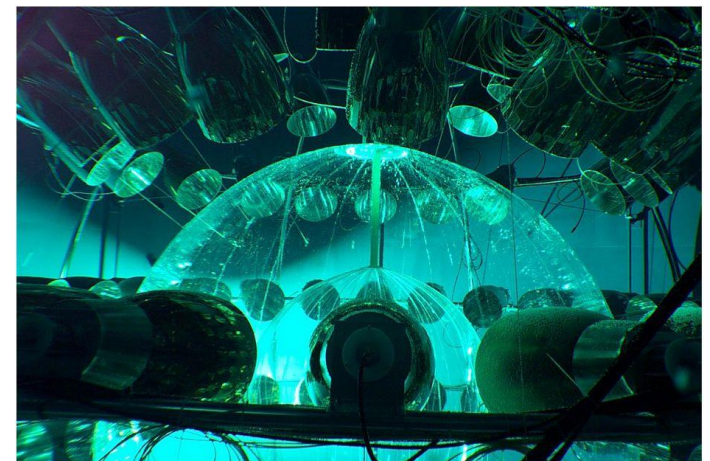


Frank Calaprice

Середина 2007: Начало набора данных

Колоссальные усилия потрачены на отбор ультранизкофоновых конструкционных материалов и приготовление ультранизкофонового сцинтиллятора.

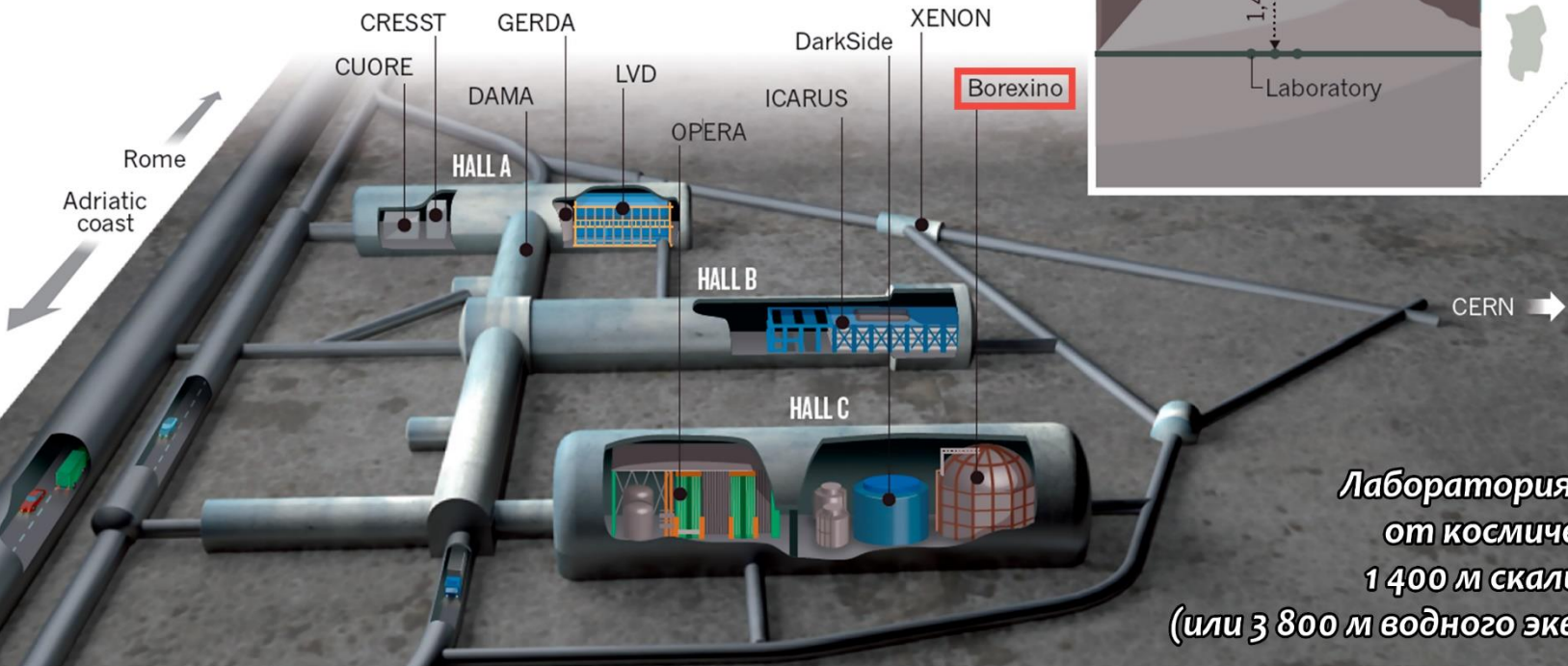
Создание уникальных технологий очистки от радиоактивности : дистилляция N_2 stripping, водная экстракция



Вид детектора STF изнутри



РАСПОЛОЖЕНИЕ ДЕТЕКТОРА **BOREXINO** В НАЦИОНАЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРИИ ГРАН-САССО



**Лаборатория защищена
от космических лучей
1 400 м скальных пород
(или 3 800 м водного эквивалента)**

За основу взято оригинальное изображение
© Nature 485, 435–438 (24 May 2012) doi:10.1038/485435a

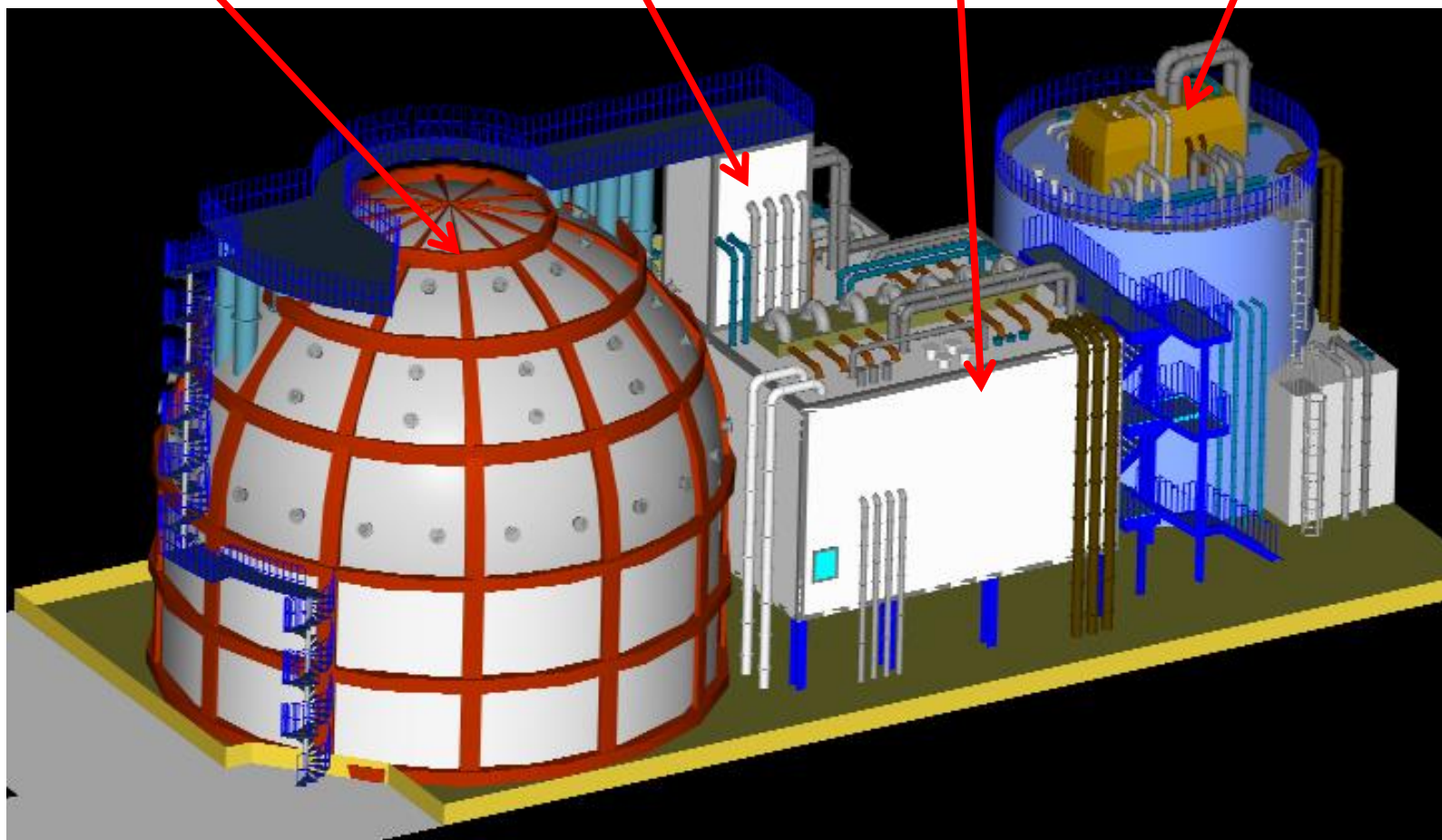
Состав детектора Borexino

Защитный кожух
сферы
детектора

Заводы по
очистке
жидкостей

Комнаты
управления

СТФ с чистыми
комнатами
В настоящее время
передан
коллаборации
DarkSide



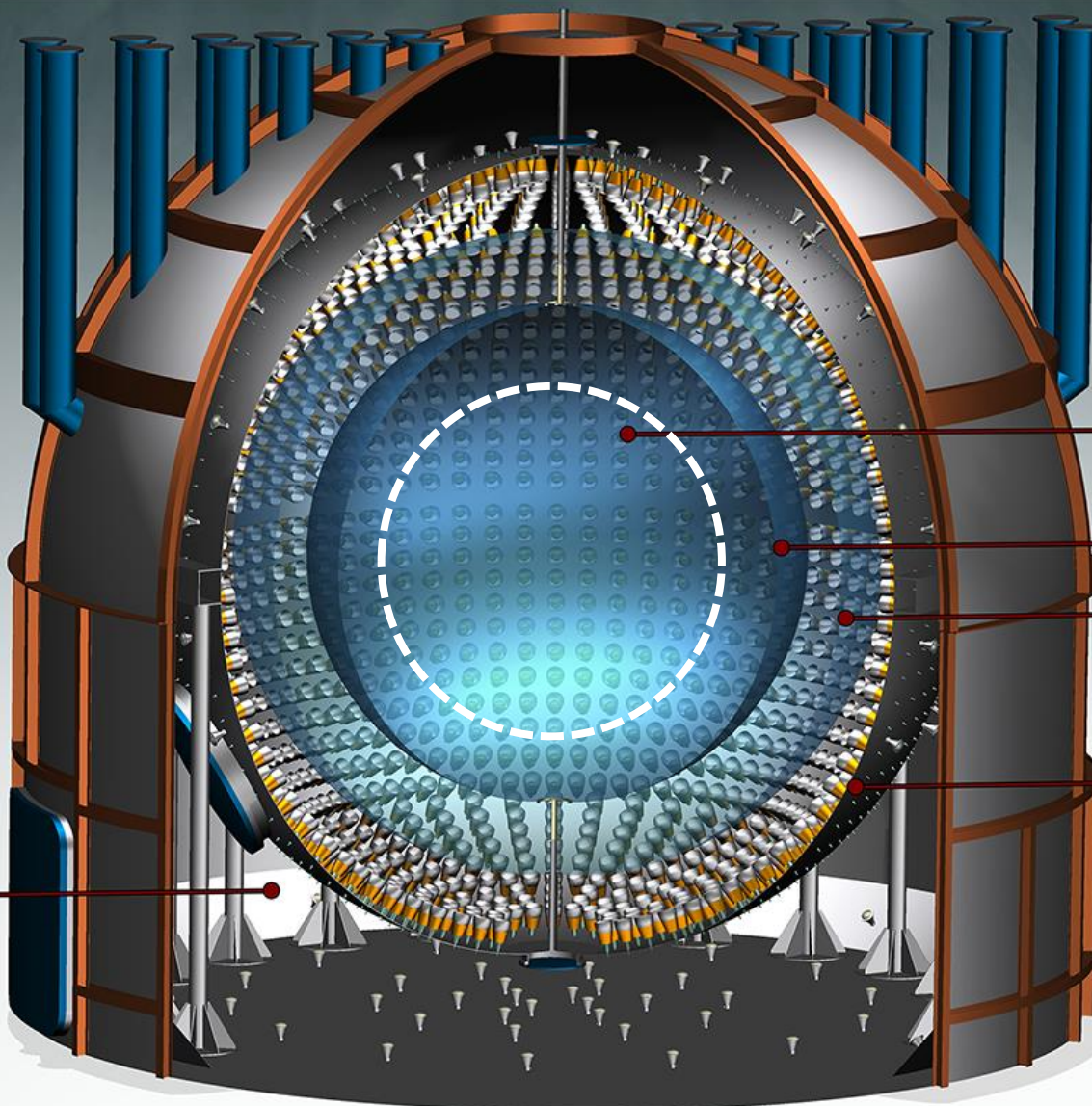
Система сбора данных Laben

Диапазон измерений:
200 кэВ - 18 МэВ
Физические задачи:
Солнечные нейтрино
Гео-нейтрино
Стерильные нейтрино
Редкие процессы



Водяной бак WT:
водный черенковский детектор,
2100 м³,
R = 9 м, H = 16.9 м,
208 ФЭУ в воде,
защита от γ , n, μ

Детектор Борексино



Система сбора данных FADC

Диапазон измерений:
1 МэВ - 50 МэВ
Физические задачи:
Вспышки сверхновых
Гео-нейтрино
Стерильные нейтрино
Редкие процессы

Мишень из сцинтиллятора:
278 т PC+PPO (1.5 г/л)

Нейлоновые сферы:
(толщина 125 мкм)
Внутренняя: 4.25 м,
Внешняя: 5.50 м
(защита от радона)

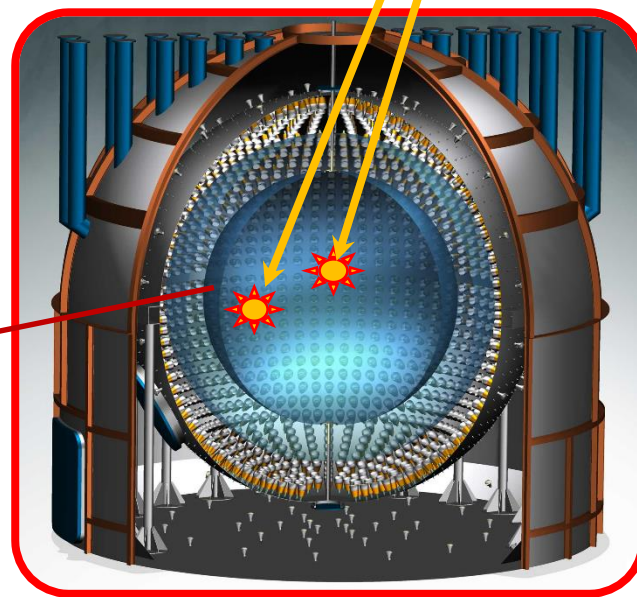
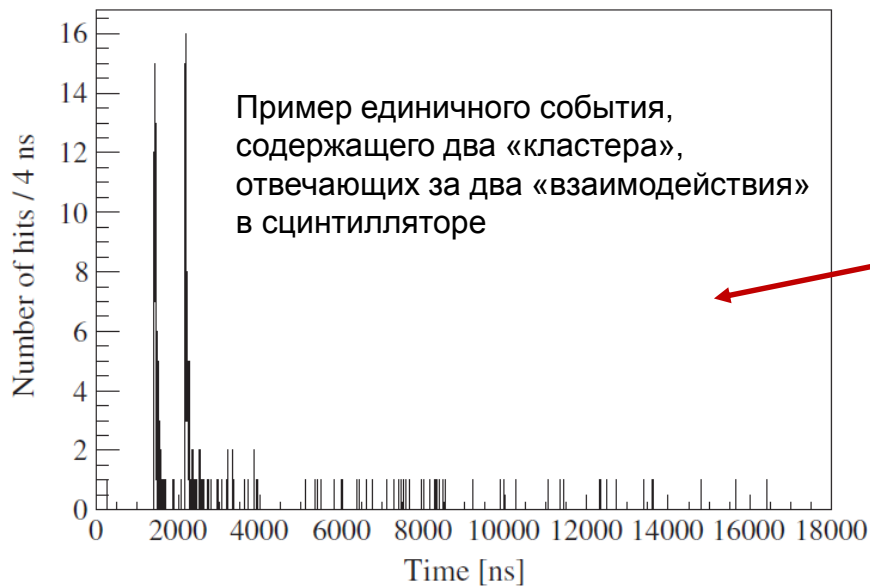
Сфера из нержавеющей стали:
1346 м³,
R = 6.85 м,
2212 8" (ETL 9351) ФЭУ
Два буфера:
323 т и 567 т
PC+DMP (5.0 г/л)

Событие в детектореorexino численно содержит

- количество фотоэлектронов (выделенная энергия), собранных каждым из сработавших ФЭУ
- положение в детекторе (временем прихода света на ФЭУ)
- тип частицы (дискриминация по форме импульса)

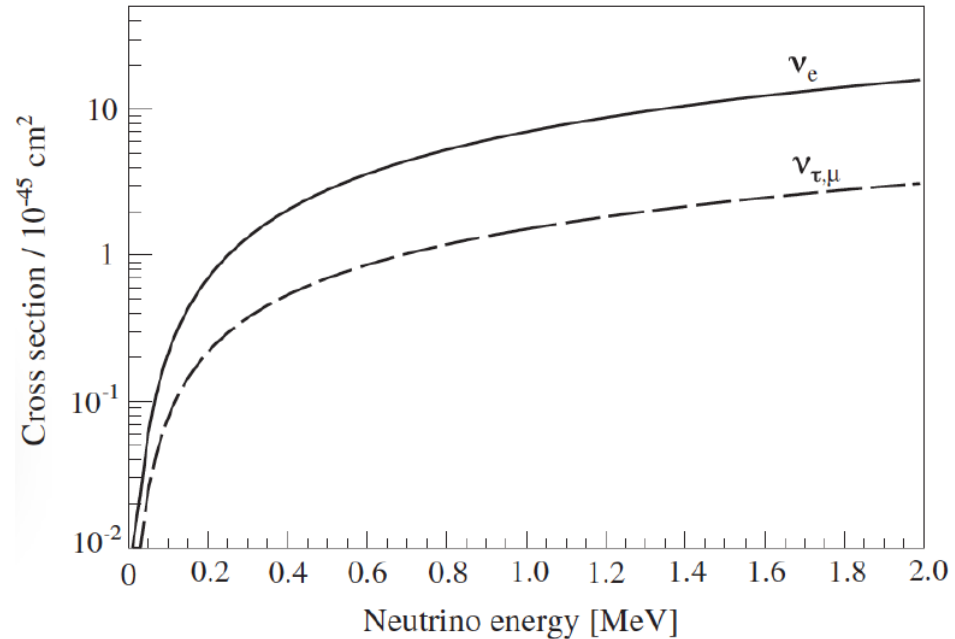
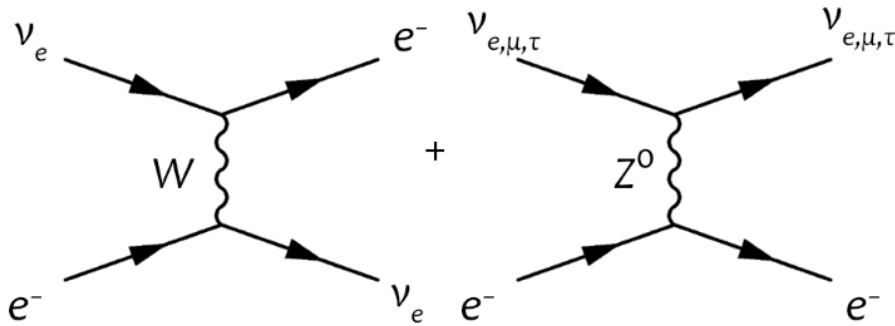
Триггер настроен на то, что должны сработать минимум 25-30 ФЭУ, (т.е. зарегистрировать хотя бы один фотоэлектрон во временном окне 99 нс) – это эквивалентно выделению энергии 50-60 кэВ. 1 МэВ электрон производит в среднем 500 фотоэлектронов

Временное окно триггера программируется и составляет 16,5 мкс, при мертвом времени 2,5 мкс.



Принцип регистрации нейтрино в детекторе Borexino

Для детектирования солнечных нейтрино используется реакция упругого рассеяние нейтрино на электронах



Сечение взаимодействия $\sigma \sim 10^{-45} \text{ cm}^2$

Количество электронов $N_e = (3.307 \pm 0.003) \times 10^{31} \text{ e}^- / 100 \text{ t}$

Поток солнечных нейтрино – $\sim 6 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

~ 200 событий в день на 100 т мишени

Ожидаемые из ССМ потоки солнечных нейтрино

Solar neutrino	Rate (counts per day per 100 t)	Flux (cm ⁻² s ⁻¹)	Flux-SSM predictions (cm ⁻² s ⁻¹)
<i>pp</i>	$134 \pm 10^{+6}_{-10}$	$(6.1 \pm 0.5^{+0.3}_{-0.5}) \times 10^{10}$	$5.98(1.0 \pm 0.006) \times 10^{10}$ (HZ) $6.03(1.0 \pm 0.005) \times 10^{10}$ (LZ)
⁷ Be	$48.3 \pm 1.1^{+0.4}_{-0.7}$	$(4.99 \pm 0.11^{+0.06}_{-0.08}) \times 10^9$	$4.93(1.0 \pm 0.06) \times 10^9$ (HZ) $4.50(1.0 \pm 0.06) \times 10^9$ (LZ)
<i>pep</i> (HZ)	$2.43 \pm 0.36^{+0.15}_{-0.22}$	$(1.27 \pm 0.19^{+0.08}_{-0.12}) \times 10^8$	$1.44(1.0 \pm 0.01) \times 10^8$ (HZ) $1.46(1.0 \pm 0.009) \times 10^8$ (LZ)
<i>pep</i> (LZ)	$2.65 \pm 0.36^{+0.15}_{-0.24}$	$(1.39 \pm 0.19^{+0.08}_{-0.13}) \times 10^8$	$1.44(1.0 \pm 0.01) \times 10^8$ (HZ) $1.46(1.0 \pm 0.009) \times 10^8$ (LZ)
⁸ B _{HER-I}	$0.136^{+0.013+0.003}_{-0.013-0.003}$	$(5.77^{+0.56+0.15}_{-0.56-0.15}) \times 10^6$	$5.46(1.0 \pm 0.12) \times 10^6$ (HZ) $4.50(1.0 \pm 0.12) \times 10^6$ (LZ)
⁸ B _{HER-II}	$0.087^{+0.080+0.005}_{-0.010-0.005}$	$(5.56^{+0.52+0.33}_{-0.64-0.33}) \times 10^6$	$5.46(1.0 \pm 0.12) \times 10^6$ (HZ) $4.50(1.0 \pm 0.12) \times 10^6$ (LZ)
⁸ B _{HER}	$0.223^{+0.015+0.006}_{-0.016-0.006}$	$(5.68^{+0.39+0.03}_{-0.41-0.03}) \times 10^6$	$5.46(1.0 \pm 0.12) \times 10^6$ (HZ) $4.50(1.0 \pm 0.12) \times 10^6$ (LZ)
CNO	<8.1 (95% C.L.)	< 7.9×10^8 (95% C.L.)	$4.88(1.0 \pm 0.11) \times 10^8$ (HZ) $3.51(1.0 \pm 0.10) \times 10^8$ (LZ)
hep	<0.002 (90% C.L.)	< 2.2×10^5 (90% C.L.)	$7.98(1.0 \pm 0.30) \times 10^3$ (HZ) $8.25(1.0 \pm 0.12) \times 10^3$ (LZ)

L. Ludhova et al.. Comprehensive measurement of pp-chain solar neutrinos. Nature, 562:505–510, 2018.

Поток $\sim 6 \times 10^{10}$ см⁻²с⁻¹ дает ~ 130 событий в день на 100 т мишени

Научная программа экспериментаorexino



Фазы I и II: измерения в двух диапазонах энергий

Низкие энергии (НЭ) ФАЗА II 0.19 – 2.93 МэВ*

Полная экспозиция 1,291.51 days x 71.3 т

pp-ν, ⁷Be-ν, pep-ν, CNO-ν

ФАЗА I и II

Borexino, SAGE,
GALLEX

Homestake

Super-K, SNO

Высокие энергии I
(ВЭ I)

3.2 – 5.7 МэВ

⁸B-ν

ВЭ I-II 2,062.4 days x
227.8 (266.0) т

Высокие энергии II
(ВЭ II)

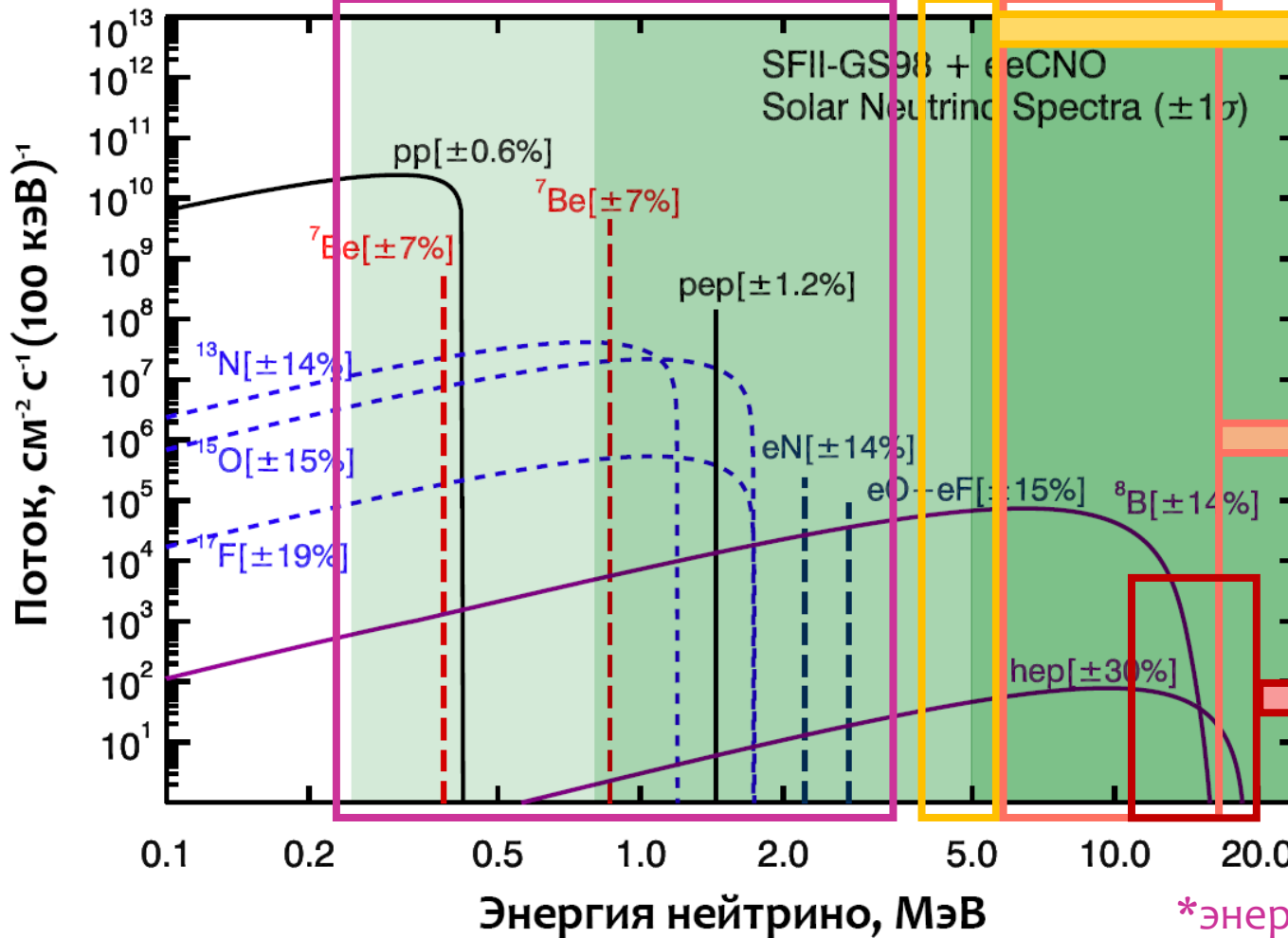
5.7 – 16.0 МэВ

⁸B-ν

Высокие энергии III
(ВЭ III)

11 – 20 МэВ

hep-ν



*энергия электронов отдачи

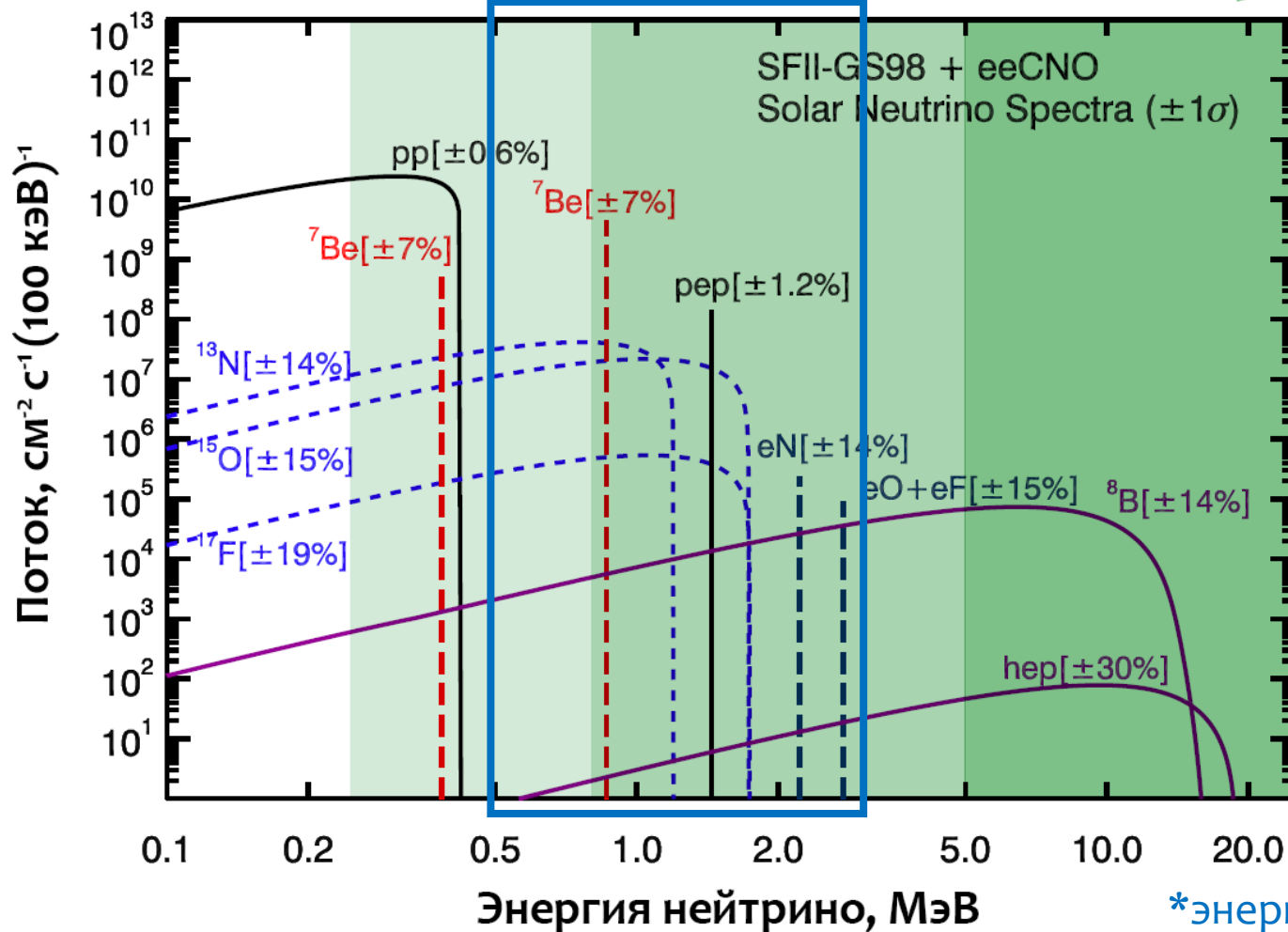
Фаза III (2016-2021) : измерения при низких энергиях

Анализируемая область 0.32 – 2.64 МэВ*

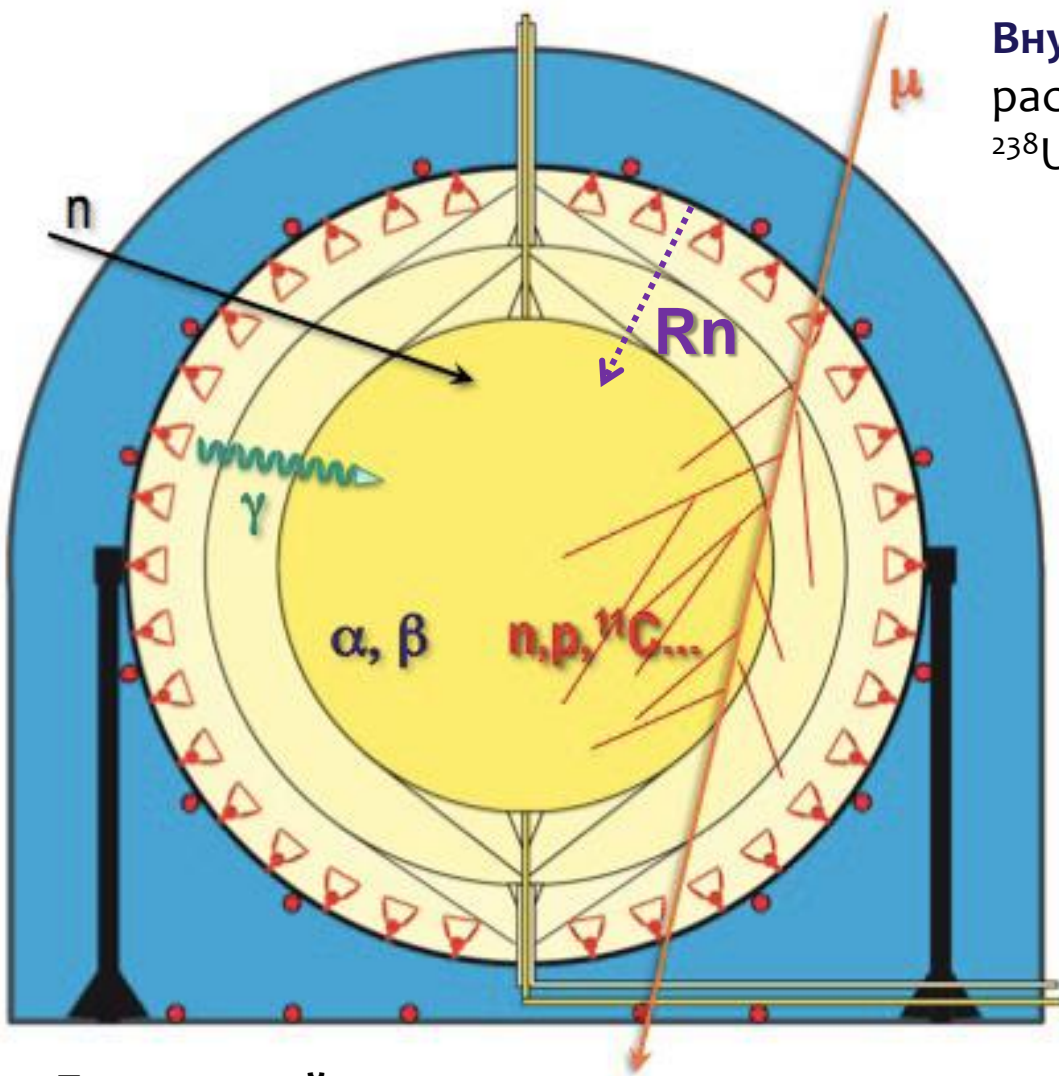
Полная экспозиция 1072 days x 71.3 t

Поиск CNO- ν

Borexino, SAGE, GALLEX Homestake Super-K, SNO



Ворехіно – установка с уникальной радиохимической чистотой



Быстрые нейтроны,
возникающие при взаимодействии
мюонов с окружением детектора

Внутренняя радиоактивность -
распады долгоживущих изотопов
 ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th , ^{40}K и их дочерних ядер

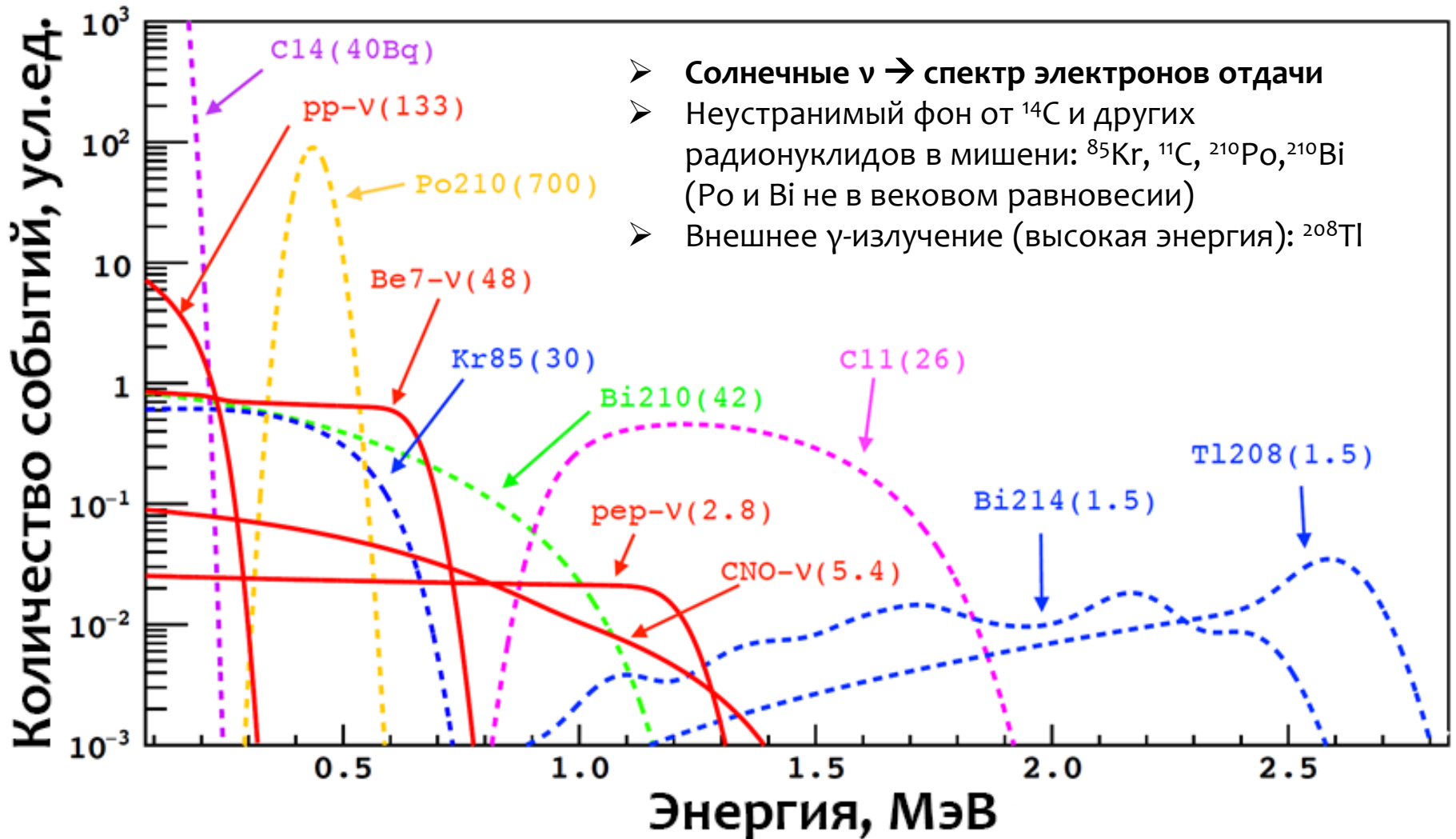
Внешнее γ -излучение
возникает в буферных объёмах,
в металлической сфере,
в стекле ФЭУ и концентраторах света;
основные источники: ^{40}K , ^{208}Tl , ^{214}Bi

Проникновение радона
в центральный детектор за счёт
диффузии и переноса
тепловыми потоками;
источники радона: ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th

«Космические» мюоны

Космогенный фон (фон от мюонов) -
нейтроны и радионуклиды,
Возникающие при взаимодействии
мюонов с материалами детектора

Монте-Карло моделирование вкладов от рассеяния нейтрино и р/а фона в наблюдаемый спектр в детекторе Борексино



Скорости счёта приведены в ср/100 т (количество событий в день в 100т)

Фоны в детекторе Borexino

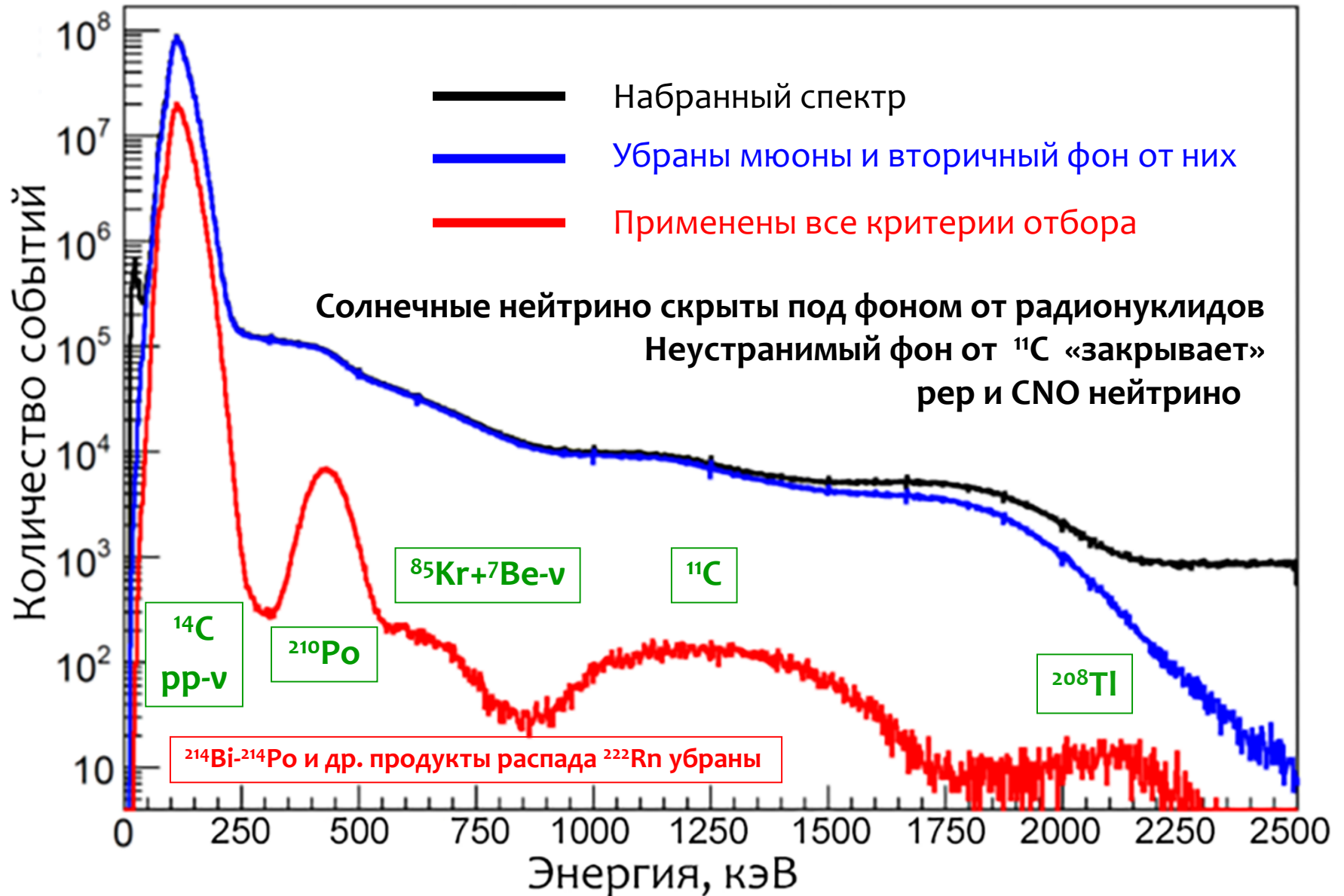
Background LER	Rate (Bq per 100 t)
^{14}C (0.156 MeV, β^-)	$[40.0 \pm 2.0]$
Background LER	Rate (counts per day per 100 t)
^{85}Kr (0.687 MeV, β^-) (internal)	6.8 ± 1.8
^{210}Bi (1.16 MeV, β^-) (internal)	17.5 ± 1.9
^{11}C (1.02–1.98 MeV, β^+) (internal)	26.8 ± 0.2
^{210}Po (5.3 MeV, α) (internal)	260.0 ± 3.0
^{40}K (1.460 MeV, γ) (external)	1.0 ± 0.6
^{214}Bi (<1.764 MeV, γ) (external)	1.9 ± 0.3
^{208}Tl (2.614 MeV, γ) (external)	3.3 ± 0.1
Background HER-I	Rate (counts per day per 227.8 t)
μ , cosmogenics, ^{214}Bi (internal)	$[6.1_{-3.1}^{+8.7} \times 10^{-3}]$
(α , n) (external)	0.224 ± 0.078
^{208}Tl (5.0 MeV, β^- , γ) (internal)	$[0.042 \pm 0.008]$
^{208}Tl (5.0 MeV, β^- , γ) (emanated)	0.469 ± 0.063
^{208}Tl (5.0 MeV, β^- , γ) (surface)	1.090 ± 0.046
Background HER-II	Rate (counts per day per 266.0 t)
μ , cosmogenics (internal)	$[3.8_{-0.1}^{+14.6} \times 10^{-3}]$
(α , n) (external)	0.239 ± 0.022

L. Ludhova et al.. Comprehensive measurement of pp-chain solar neutrinos. Nature, 562:505–510, 2018.

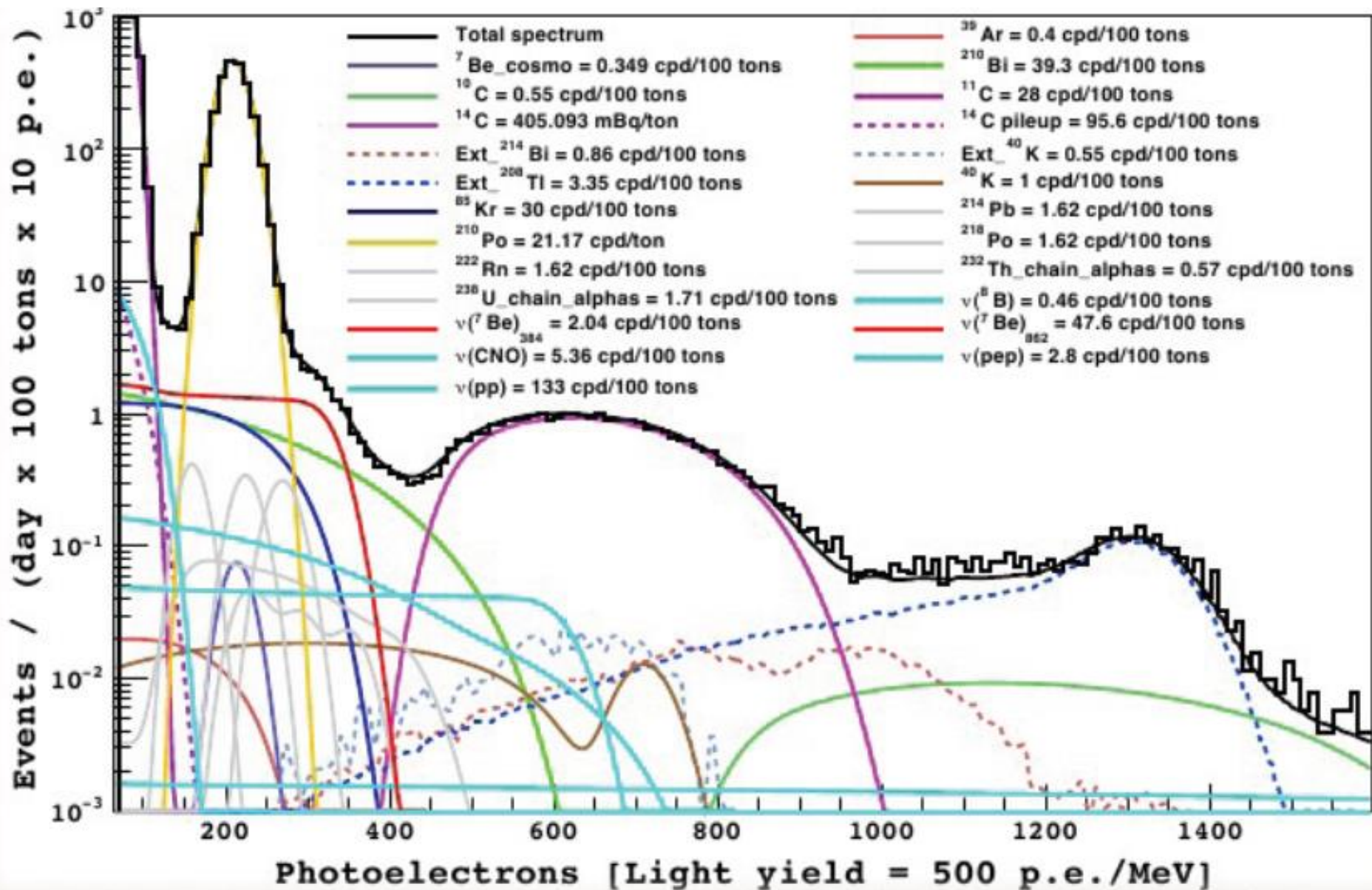
$5 \cdot 10^{-9}$ Бк/кг (вода 10 Бк/кг, человеческое тело 5000 Бк/кг)

Спектр до/после отбора событий ФАЗА I и II

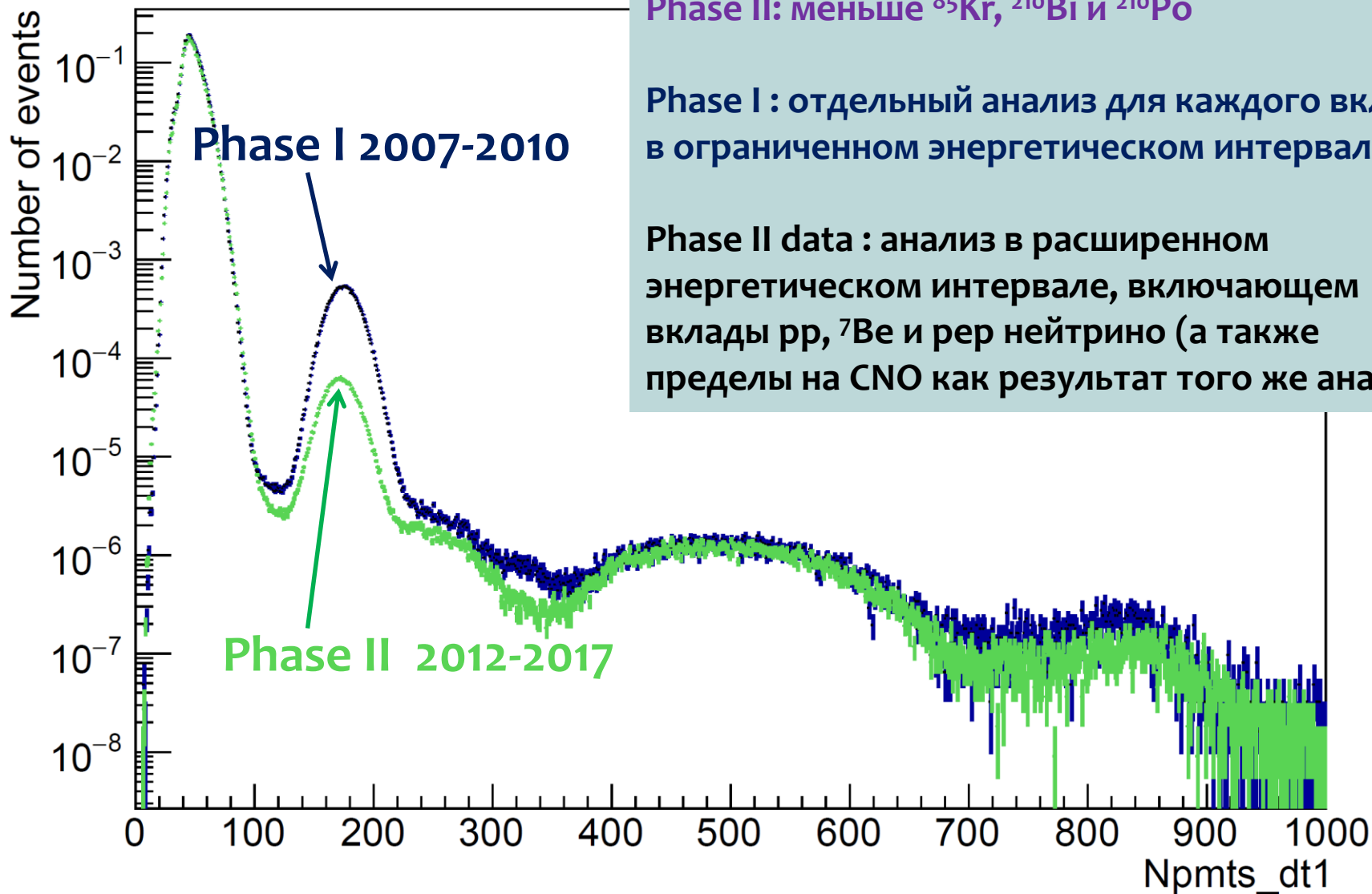
(область малых энергий: 0.19 – 2.93 МэВ)

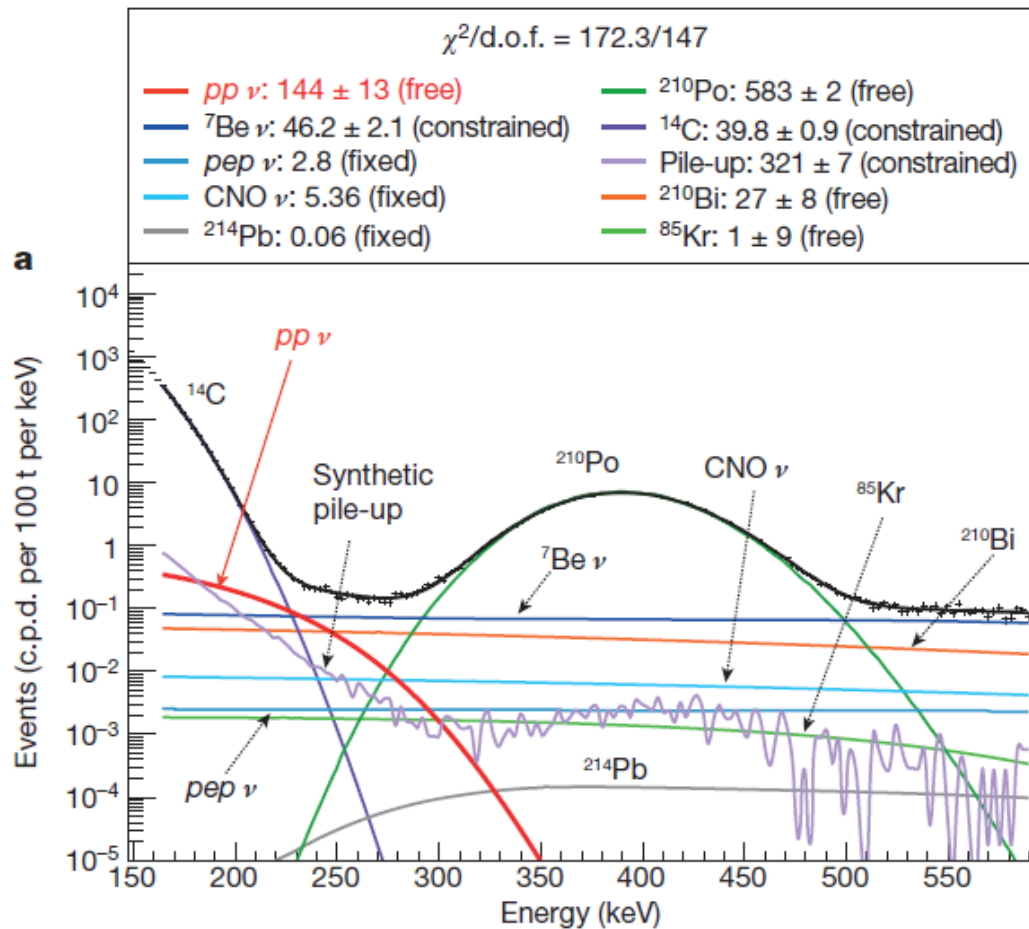


Обработанный «Спектр» регистрации упругого рассеяния нейтрино на электронах.



Разница анализов в Фазе I и Фазе II за счет проведенной очистки детектора





В 2014 г. в первые был измерен поток пр-нейтрино с точностью ~11%

$pp = 144 \pm 13$ (stat) ± 10 (syst) cpd/100 t

(MSW/LMA, HM) 131 ± 2 cpd/100 t

G. Bellini et al. (Borexino Collaboration), "Neutrinos from the primary proton–proton fusion process in the Sun", Nature 512, 383 (2014).

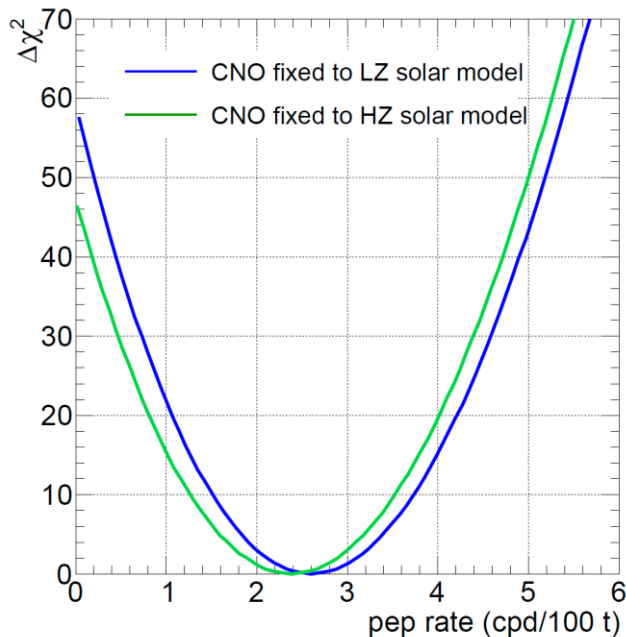
Table 1 | Results from the fit to the energy spectrum

Parameter	Rate \pm statistical error (c.p.d. per 100 t)	Systematic error (c.p.d. per 100t)
pp neutrino	144 ± 13	± 10
^{85}Kr	1 ± 9	± 3
^{210}Bi	27 ± 8	± 3
^{210}Po	583 ± 2	± 12

The best-fit value and statistical uncertainty for each component are listed together with its systematic error. The χ^2 per degree of freedom of the fit is $\chi^2/\text{d.o.f.} = 172.3/147$.

Обновленные результаты экспериментаorexino (2018 г.)

	Предыдущие (2014) свд/100 т	Текущие(2018) свд/100 т	Точность измерений, %	Точность теории (HZ/LZ)
pp-ν	144±13±10	134±10 ⁺⁶ ₋₁₀	11.4→10.6	(HZ) 1.8 / (LZ) 1.7
⁷ Be-ν	46.0±1.5 ^{+1.6} _{-1.5}	48.3±1.1 ^{+0.4} _{-0.7}	4.8→ 2.7	(HZ) 6.1 / (LZ) 5.9
реp-ν	3.1±0.6±0.3	(HZ) 2.43±0.36 ^{+0.15} _{-0.22}	(HZ) 22→17	(HZ) 1.8
		(LZ) 2.65±0.36 ^{+0.15} _{-0.24}	(LZ) 22→16	(LZ) 1.8



Регистрация реp-ν нейтрино с достоверностью >5σ

CNO: Предел на скорость счёта CNO- ν (95% Д.И.):
 $R(\text{CNO}) < 8.1$ свд/100 т
 на поток (95% Д.И.): $\varphi(\text{CNO}) < 7.9 \cdot 10^8$ см⁻²с⁻¹
 Ожидается: (HZ) 4.92±0.55, (LZ) 3.52±0.37 свд/100 т (2σ)

В фазе II для разделения CNO-ν и реp-ν использовалось теоретическое отношение потоков pp-ν и реp-ν (слабое ограничение) вместо теоретического значения потока реp-ν, применявшегося в фазе I (сильное ограничение)

Светимость Солнца

$$L_{\nu}^{\text{Borexino}} = (3.89^{+0.35}_{-0.42}) \times 10^{33} \text{ эрг/с}$$

L. Ludhova et al.. Comprehensive measurement of pp-chain solar neutrinos. Nature, 562:505–510, 2018.

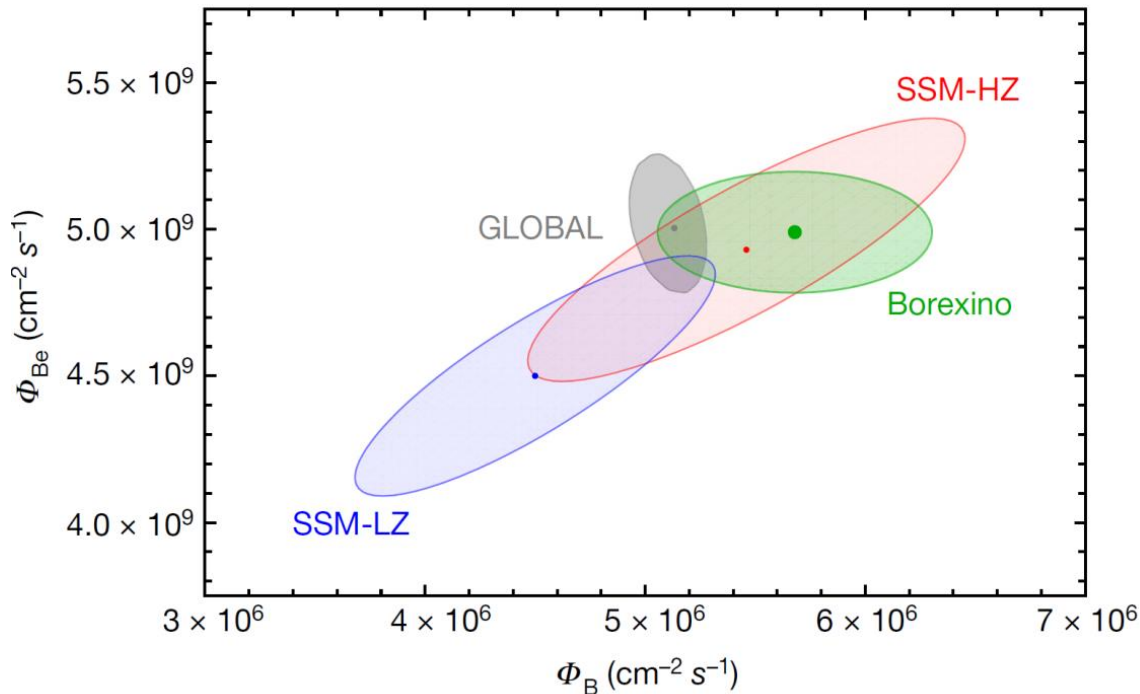
Согласуется со значением светимости Солнца,
полученной при измерениях
в электромагнитном канале с помощью КА:

$$L_{\gamma} = (3.846 \pm 0.015) \times 10^{33} \text{ эрг/с}$$

Chapman, G. A. in Encyclopedia of Planetary Science and Encyclopedia of Earth Science 748 (Springer, 1997).

Fruhlich, C. & Lean, J. The Sun's total irradiance: cycles, trends and related climate change uncertainties since 1976. Geophys. Res. Lett. 25, 4377 (1998).

Влияние значений измеренных потоков нейтрино на решение проблемы металличности Солнца



Глобальный фит данных

BX + KamLAND

$$f_{\text{Be}} = \frac{\Phi(\text{Be})}{\Phi(\text{Be})_{\text{HZ}}} = 1.01 \pm 0.03$$

$$f_{\text{B}} = \frac{\Phi(\text{B})}{\Phi(\text{B})_{\text{HZ}}} = 0.93 \pm 0.02$$

Результаты Borexino для потоков ${}^7\text{Be}$ и ${}^8\text{B}$ нейтрино (зеленая точка и зеленый эллипс).

Экспериментальные данные о Солнце и KamLAND в глобальном анализ и оставляя свободными параметры осцилляций θ_{12} и Δm_{12}^2 (серый эллипс, помеченный как GLOBAL).

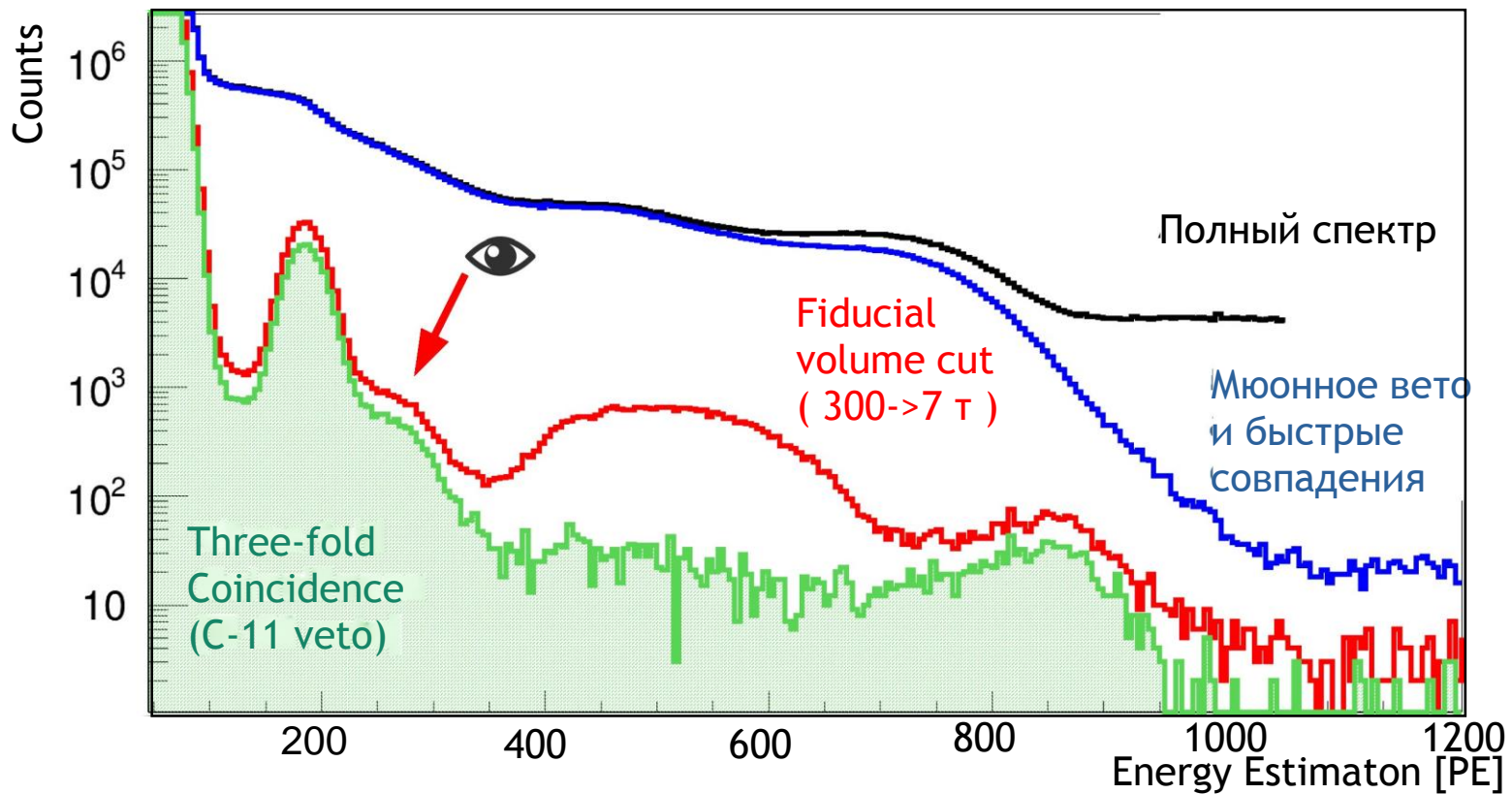
Теоретический прогноз для низкой металличности (LZ) (синий) и с высокой металличностью (HZ) (красный) Standard Solar Модели (SSM) 18 также показаны. Подгонка возвращает следующее колебание параметры: $\tan^2\theta_{12} = 0,47 \pm 0,03$ и $\Delta m_{12}^2 = (7,5 \times 10^{-5}) \pm 0,03$, в согласии с тем, что сообщается в исх. 19 ($\sin^2\theta_{13}$ фиксируется на 0,0217; ссылка 19). Все контуры соответствуют 68,27% Д.И.

Найдено указание на высокую металличность Солнца. Допуская, что HZ-SSM правильная, данные Borexino исключают LZ-SSM с достоверностью 96.6% Д.И.

Научная программа экспериментаorexino

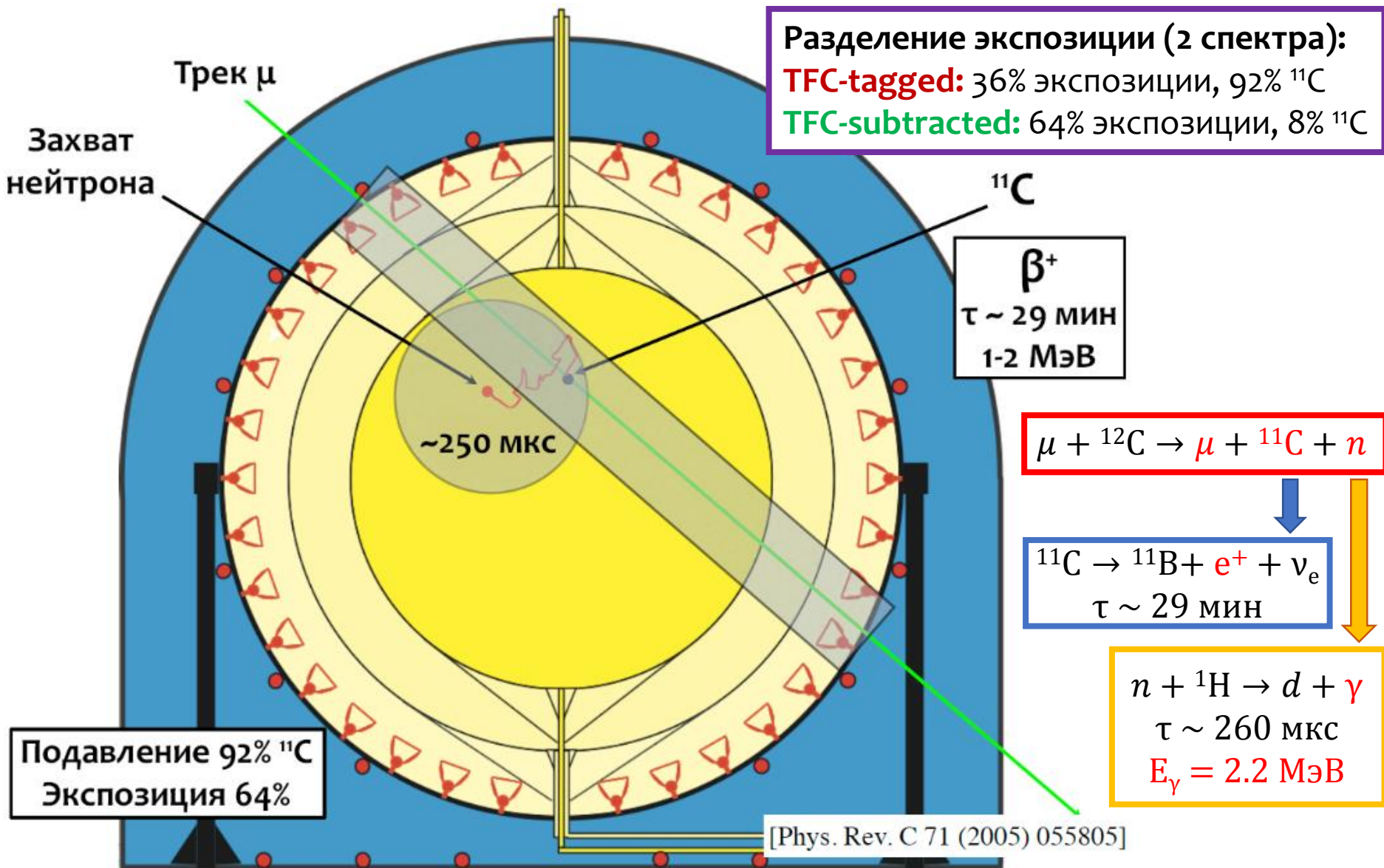


Энергетический спектр событий в детекторе Борексино Фаза III



Метод тройных совпадений для отбора ^{11}C

(so-called the Three-Fold Coincidence technique – TFC)



Многопараметрическая аппроксимация на основе метода максимального правдоподобия

Поточечный (binned) поиск максимума следующей функции правдоподобия:

$$\mathcal{L}(\vec{\theta}) = \mathcal{L}_{\text{sub}}(\vec{\theta}) \mathcal{L}_{\text{tag}}(\vec{\theta}) \mathcal{L}_{\text{rad}}(\vec{\theta}) \mathcal{L}_{\text{PS}}(\vec{\theta})$$

Энергетический спектр
с подавленным ^{11}C

Энергетический спектр
с меченым ^{11}C

Пространственное
распределение
событий

Параметр
разделения событий
по форме импульса

$\vec{\theta}$ - неизвестные параметры (скорости счёта ν событий: pp- ν , ^7Be - ν , pep- ν , CNO- ν)

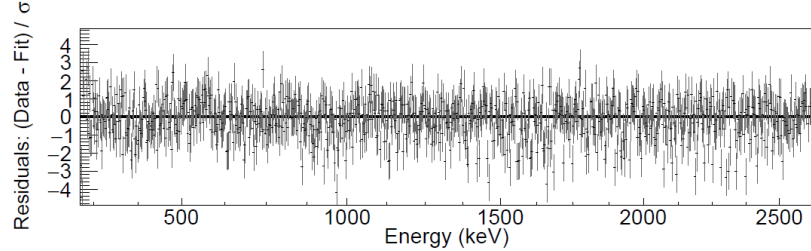
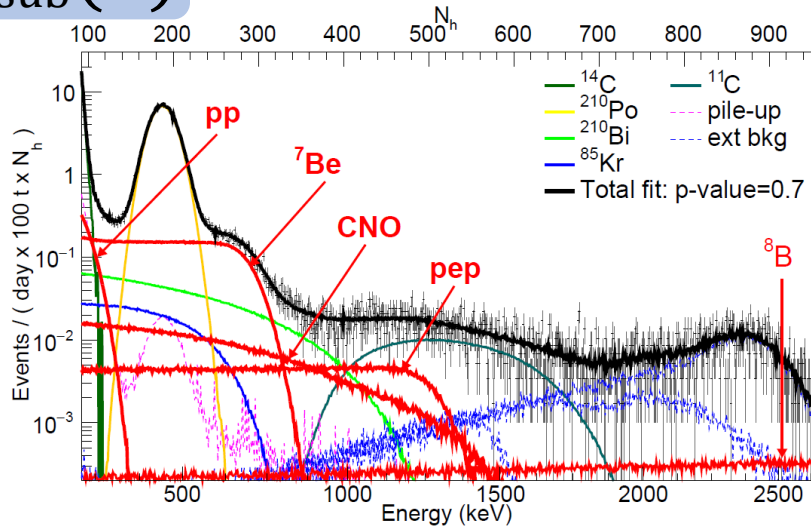
Спектральные компоненты для аппроксимации получают двумя способами:

А) Монте-Карло моделирование, Б) численно-аналитическое вычисление

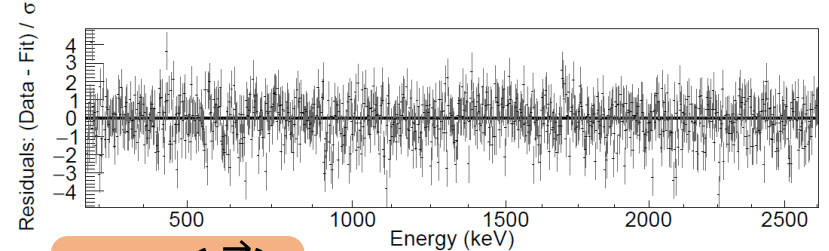
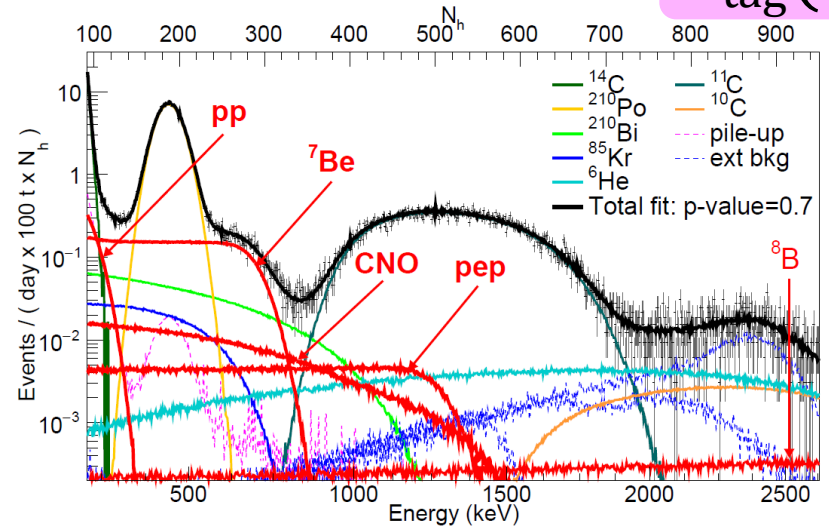
Используются по очереди оба набора спектральных компонентов
Результаты близки, разница включается в систематическую ошибку

Результаты аппроксимации

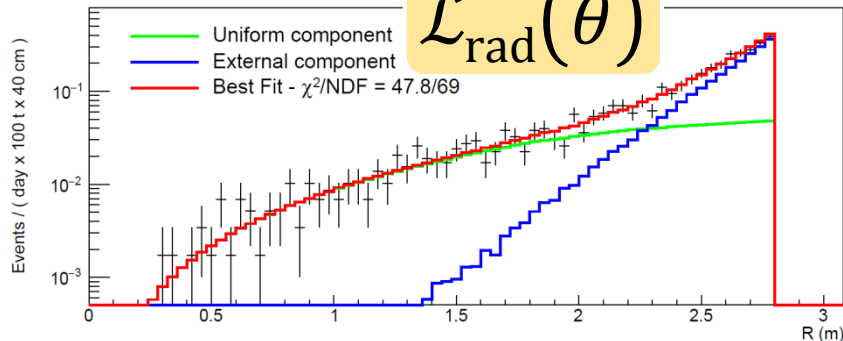
$$\mathcal{L}_{\text{sub}}(\vec{\theta})$$



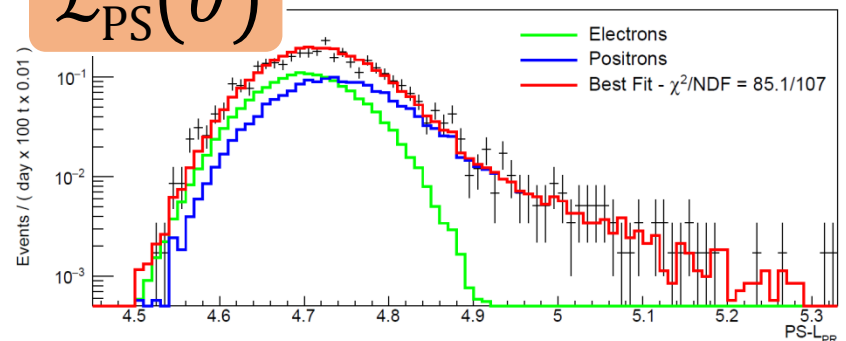
$$\mathcal{L}_{\text{tag}}(\vec{\theta})$$



$$\mathcal{L}_{\text{rad}}(\vec{\theta})$$

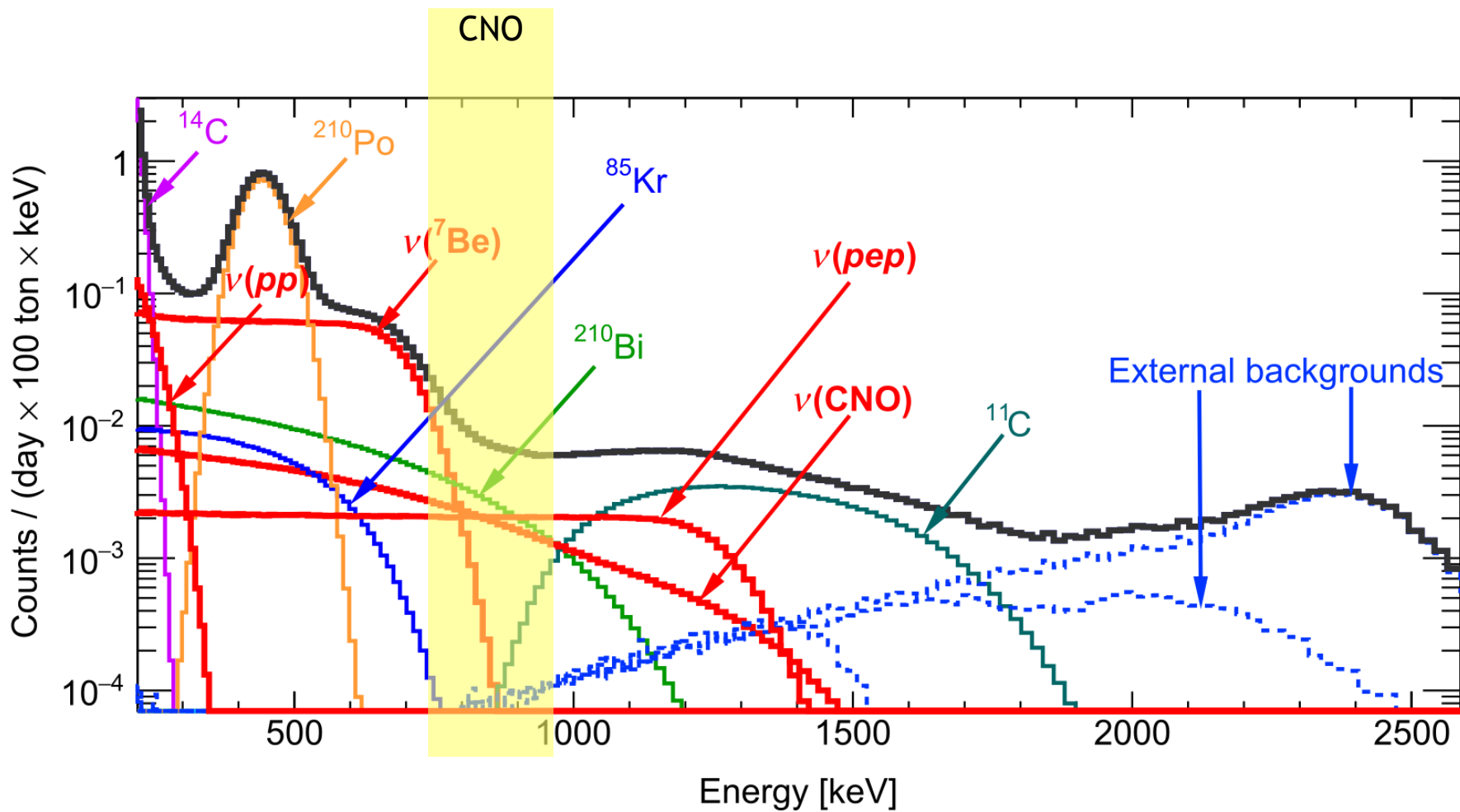


$$\mathcal{L}_{\text{PS}}(\vec{\theta})$$



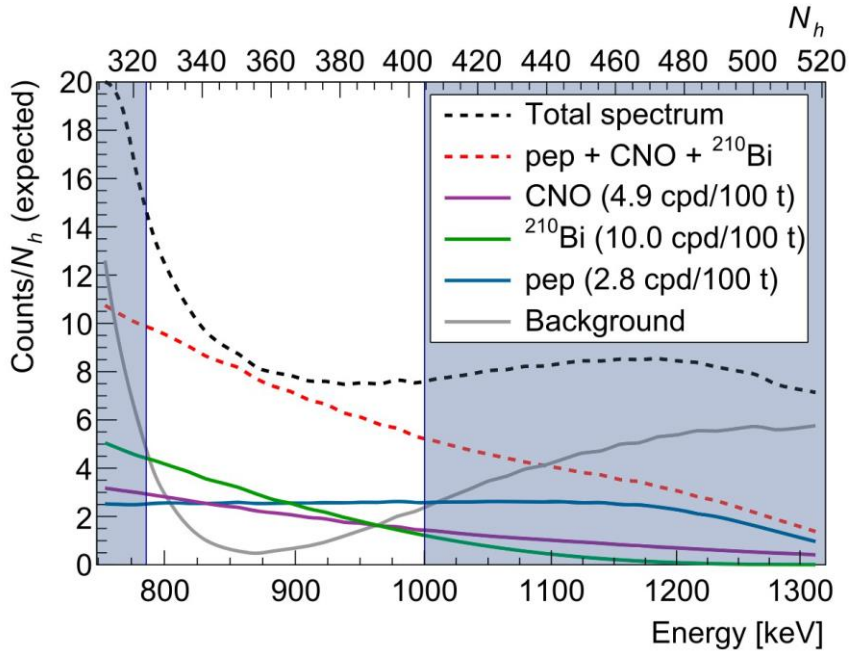
Энергетический спектр Борексино

(область в которой возможна регистрация CNO нейтрино)



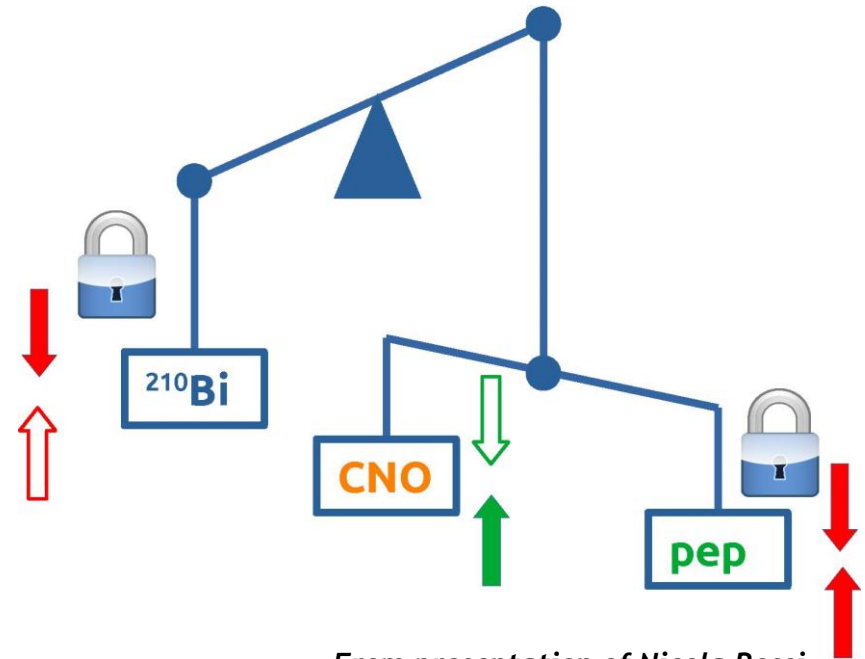
Решение проблемы чувствительности к CNO-нейтрино

Region of Interest



CNO <> pep <> ²¹⁰Bi

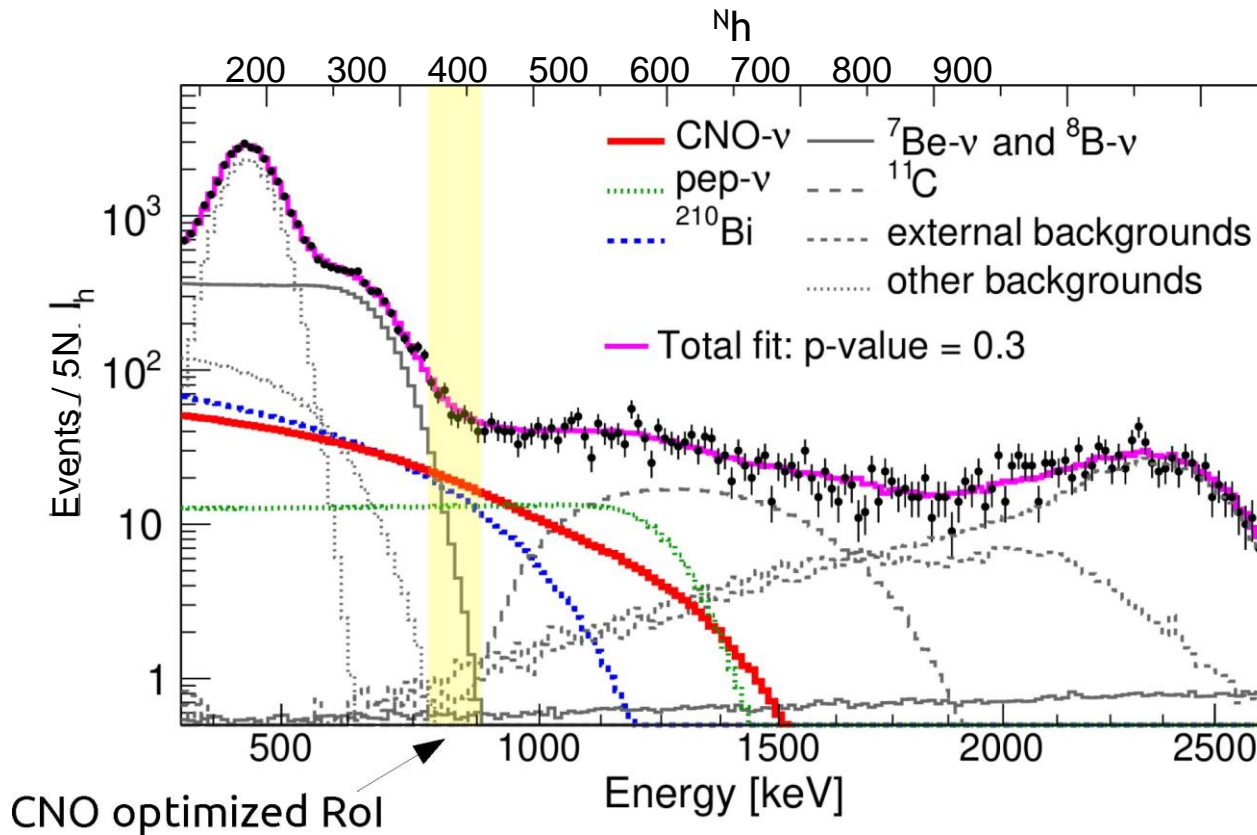
Необходимо было придумать как разделить вклады от разных источников в ROI



From presentation of Nicola Rossi

Решение - независимые ограничения на разные вклады в спектр - pep и Bi-210

Анализ CNO нейтрино



A) pep 1.4%
Symmetric penalty

B) ${}^{210}\text{Bi}$ 11%
Asymmetric penalty

1. Multivariate
Montecarlo Fit

2. Counting
Analysis (Rol)
Analytical modelling
(consistency check)

Независимое ограничение на рер

$$pp: p + p \rightarrow d + e + \nu_e$$

Ограничение 1.4%

$$rer: p + e + p \rightarrow d + \nu_e$$

rer ограничения

1. Из теоретического pp/rer отношения (pp измерены)
2. Экспериментальные данные о солнечных нейтрино
3. Ограничение на **Светимость Солнца** (0.4%)
4. Параметры осцилляции из глобального фита

Эти ограничения не связаны с CNO-нейтрино

Диффузия:

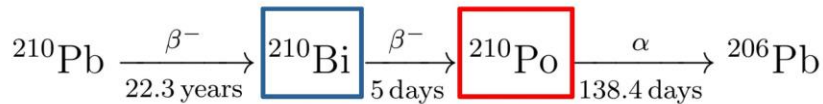
Очень медленная $\sim 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$

Конвекция:

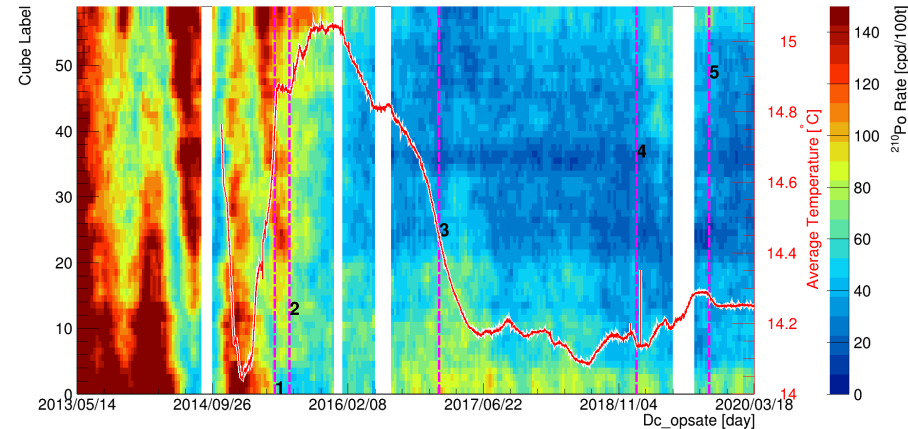
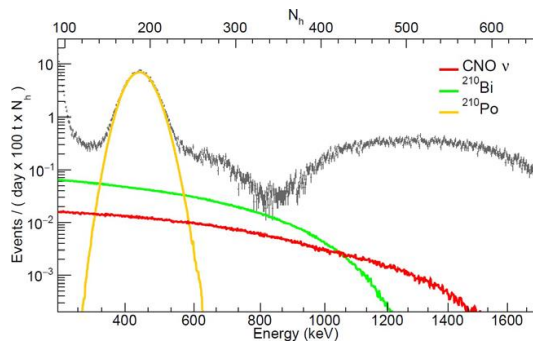
Po-210 поступающий снаружи

Термоизоляция детектора

Независимые ограничения ^{210}Bi 11%



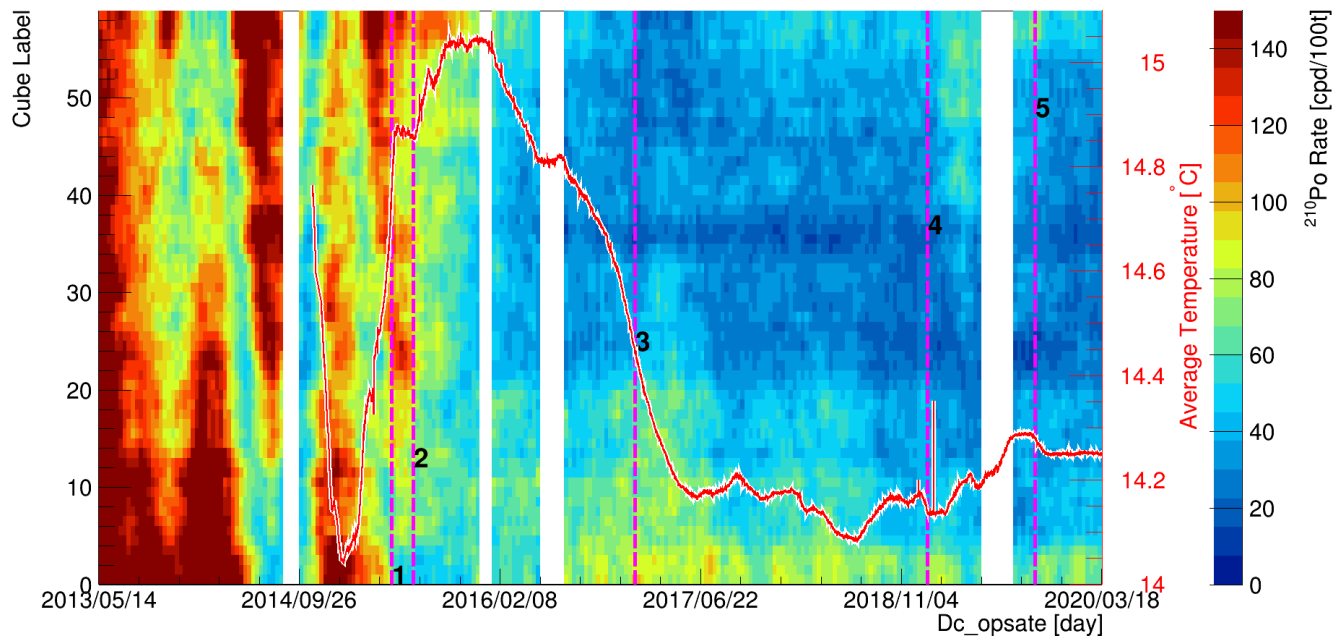
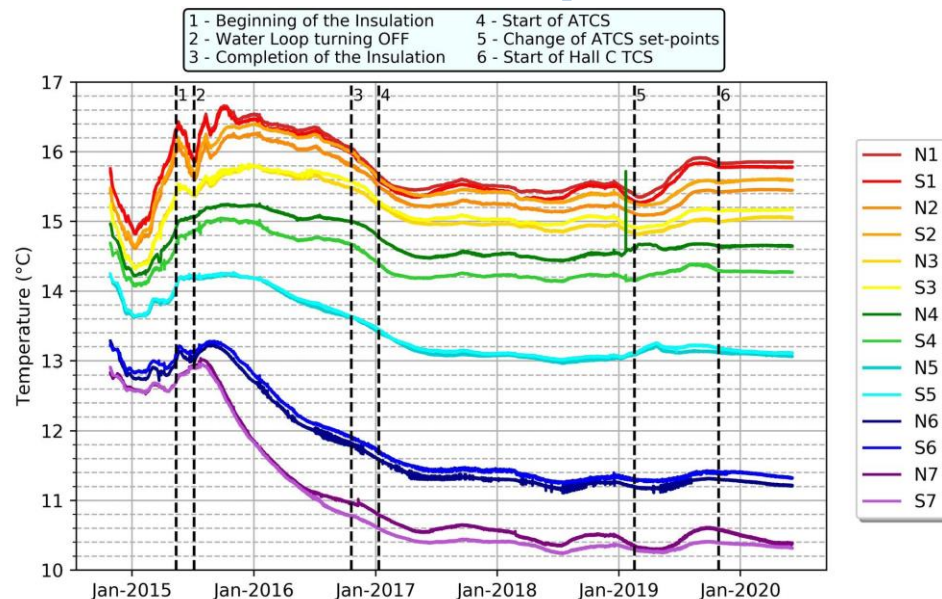
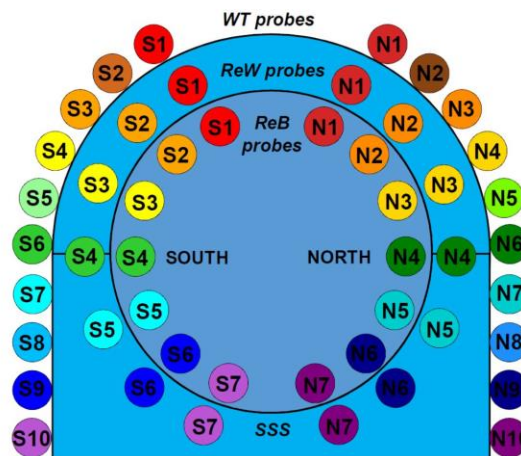
Используем **вековое равновесие** цепочки A=210



1. Плато - симметричные ограничения
2. Минимум концентрации -> верхний предел

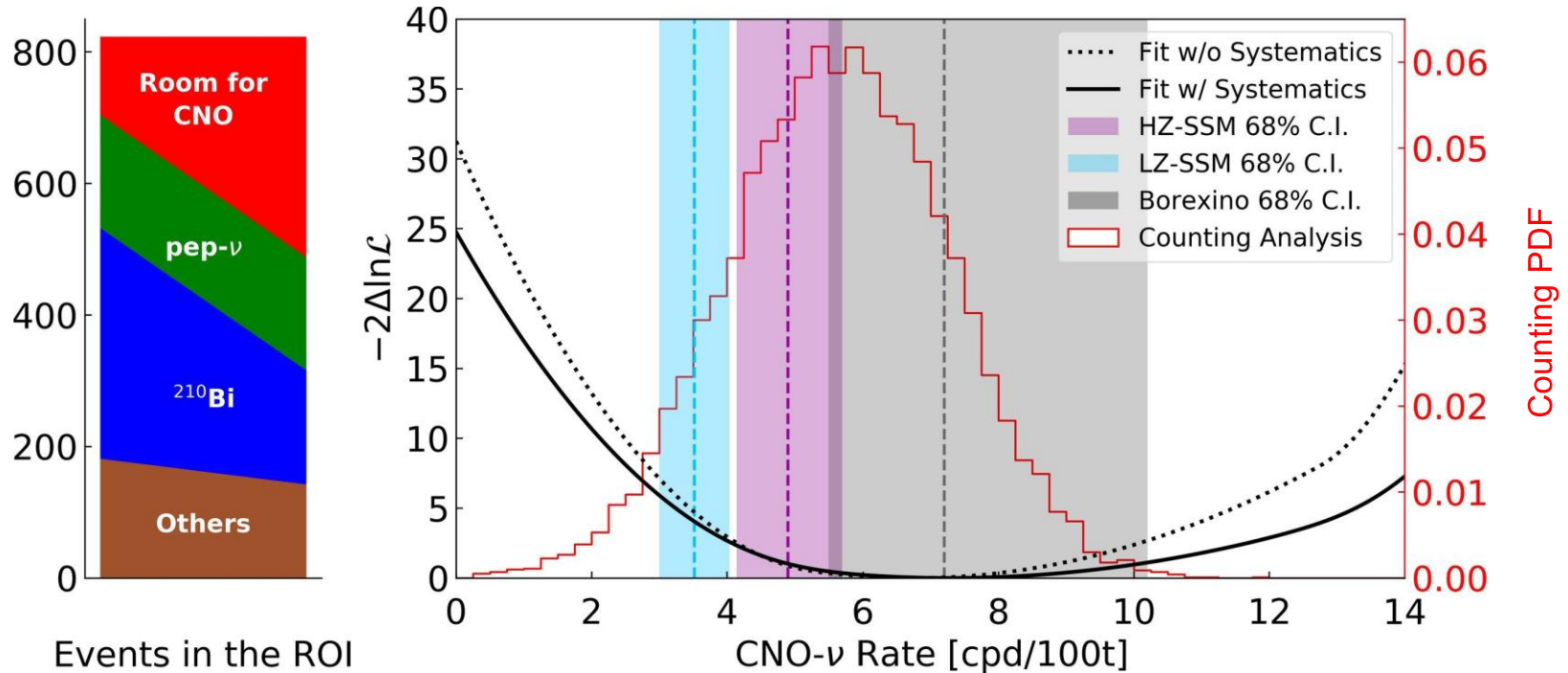
$$R(^{210}\text{Bi}) \leq 11.5 \pm 1.3 \text{ cpd}/100\text{t}$$

Влияние термоизоляции на концентрацию Po210



Существенное подавление
счёта ^{210}Po за счёт почти
полного подавления
конвективных явлений

Конечный результат по регистрации CNO нейтрино



Result (68% CL stat + sys) = $7.2_{-1.7}^{+3.0}$ cpd/100t

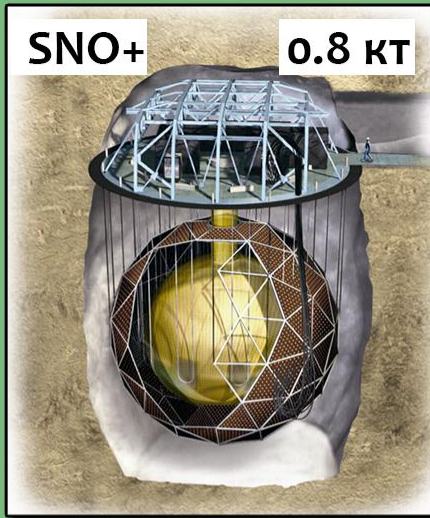
Итогом более 20-летних усилий эксперимента Borexino стало прямое измерение спектра и потока нейтрино от термоядерных реакций на Солнце

Тип нейтрино	Ссылки	Скорость счета [cpd/100t]	Поток [cm ⁻² s ⁻¹]
pp	Nature 2014, Nature 2018, PRD 2019	$134 \pm 10_{-10}^{+6}$	$6.1 \pm 0.5_{-0.5}^{+0.3} \times 10^{10}$
⁷ Be	PLB 2008, PRL 2011, Nature 2018, PRD 2019	$48.3 \pm 1.1_{-0.7}^{+0.4}$	$4.99 \pm 0.11_{-0.08}^{+0.06} \times 10^9$
pep	PRL 2012, Nature 2018 PRD 2019	$2.65 \pm 0.36_{-0.24}^{+0.15}$	$1.27 \pm 0.19_{-0.12}^{+0.08} \times 10^8$
⁸ B	PRD 2010, Nature 2018, PRD 2020	$0.223_{-0.022}^{+0.021}$	$5.68_{-0.41-0.03}^{+0.39+0.03} \times 10^6$
hep	Nature 2018	<0.002 (90% CL)	<2.2x10 (90% CL)
CNO	Nature 2020	$7.2_{-1.7}^{+3.0}$	$7.0_{-2.0}^{+3.0} \times 10^8$

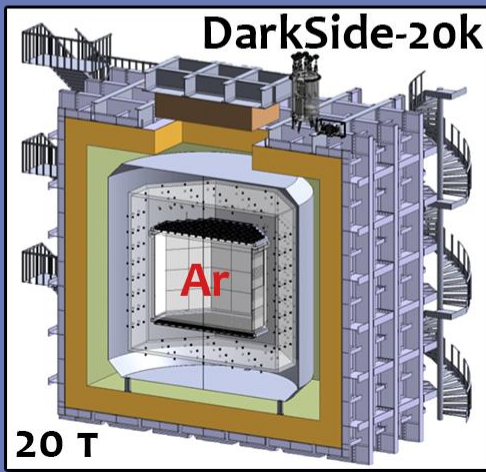
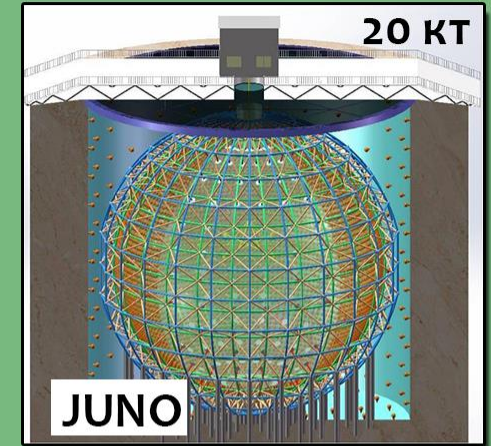
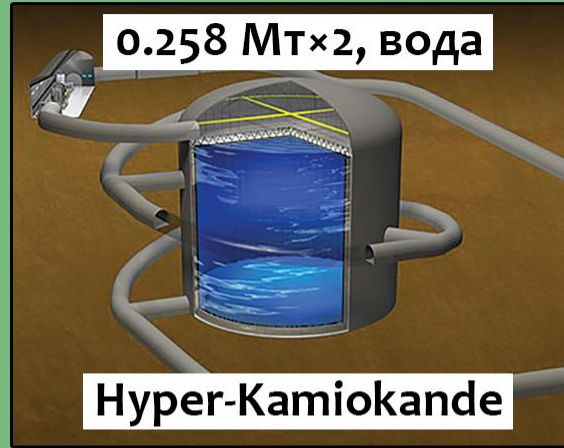
Слагаемые успеха эксперимента BOREXINO

- дружная высокопрофессиональная интернациональная команда
- достигнутый успех в беспрецедентном снижении уровня остаточной радиоактивности в сцинтилляторе
- хорошее знание отклика детектора за счет калибровочных кампаний
- детальная Монте Карло модель детектора вместе с электронным трактом
- хорошее знание собственных фонов за счет тщательных дополнительных исследований
- тщательно разработанный комплекс программ offline анализа постоянно верифицируемый на Монте Карло данных
- стабильная электроника

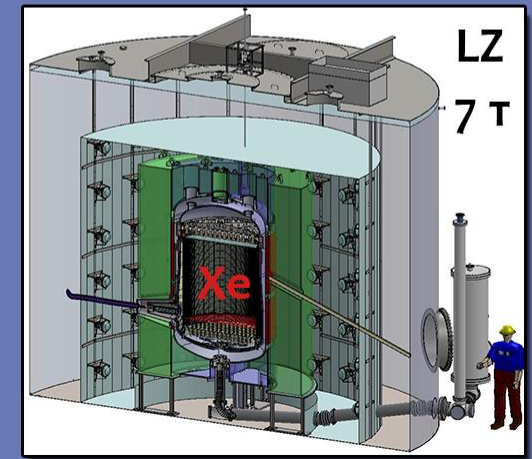
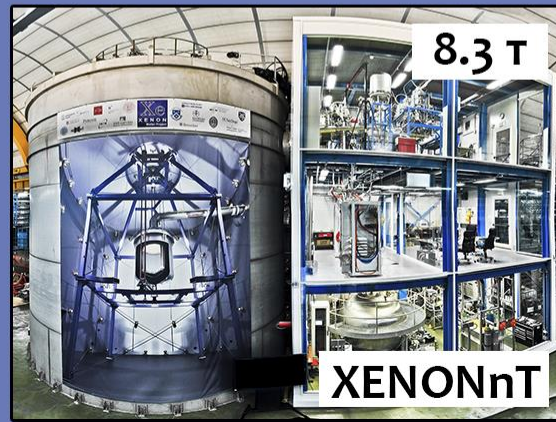
Новое поколение детекторов



Нейтринные детекторы



Детекторы тёмной материи



Детекторы стали массивнее, но они не “большиеorexino”...

Спасиѡо за вниманиe!